



Biocontrôle

Éléments pour une protection
agroécologique des cultures

Biocontrôle

Éléments pour une protection agroécologique des cultures

X. Fauvergue, A. Rusch, M. Barret, M. Bardin,
E. Jacquin-Joly, T. Malausa, C. Lannou, coord.

Collection *Savoir-faire*

Connectivité et protection de la biodiversité marine
Dynamique spatiale des organismes marins
B. Porro, N. Alloncle, N. Bierne, S. Arnaud-Haond, coord.
2019, 136 p.

Aquaponie
Associer aquaculture et production végétale
P. Foucard, A. Tocqueville, coord.
2019, 210 p.

L'escargot *Helix aspersa*
Biologie-élevage
J.-C. Bonnet, P. Aupinel, J.-L. Vrillon
2019, 126 p.

Principe des technologies de biologie moléculaire et génomique
3^e édition revue et augmentée
D. Tagu, S. Jaubert-Possamai, A. Méreau, coord.
2018, 312 p.

Réussir le tempérage du chocolat
Les clés d'un savoir-faire
I. Christian
2018, 124 p.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex

© Éditions Quæ, 2020

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-3076-1
ISBN (pdf) : 978-2-7592-3077-8
ISBN (ePub) : 978-2-7592-3078-5

ISSN : 1952-1251

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Introduction	7
La nécessité de protéger les cultures, mais autrement	8
Le biocontrôle : un regard neuf sur une approche ancienne	9
L'arsenal du biocontrôle	10
Des défis à relever	15
Combiner le biocontrôle avec les autres méthodes de gestion de la santé des plantes	17
Partie I – La lutte biologique, bases théoriques et applications	19
1. Systématique intégrative et adaptation des auxiliaires à leurs hôtes	21
Généralités sur la diversité des macroorganismes auxiliaires	22
L'identification des macroorganismes auxiliaires, un vrai défi !	26
Focus sur trois thématiques éco-évolutives transversales	30
Conclusion	35
2. Biologie des populations introduites	37
Ces idées qui éveillent.....	38
Lois des petits nombres : stochasticité démographique et environnementale.....	41
Perte de bénéfiques à petit effectif : effet Allee	43
Génétique des populations introduites	45
Conclusion	47
3. Lutte biologique par acclimatation	49
Définition, histoire et évolution	50
Le voyage exploratoire	53
Importation du matériel exotique et évaluation au laboratoire.....	56
L'introduction dans le milieu naturel	58
Conclusion et perspectives	60
4. Lutte biologique par augmentation à l'aide d'arthropodes entomophages	63
Présentation du contexte et définitions.....	63
Enjeux actuels	65
Axes d'amélioration pour la lutte biologique par augmentation	69
Conclusion	72
5. Principes, mise en œuvre et perspectives de la technique de l'insecte stérile	75
Bases techniques.....	76
Conditions d'application	78

Forces et faiblesses de la TIS	80
Perspectives de recherche.....	81
Implications environnementales et sociologiques	83
Des insectes et des hommes.....	84
Conclusion	87
Partie II – Stimuler les régulations naturelles dans les paysages agricoles.....	89
6. Écologie des communautés, réseaux trophiques et régulation naturelle	91
Types d'interaction au sein des communautés et régulation naturelle	94
Relations entre diversité horizontale des communautés d'ennemis naturels et régulation naturelle.....	95
Effet de la diversité verticale des communautés sur les niveaux de régulation naturelle	98
Métacommunautés et écologie du paysage	103
Conclusion	107
7. Gestion agroécologique des insectes ravageurs de la parcelle au paysage.....	109
Principes de la lutte biologique par conservation.....	110
Effets des pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle.....	112
Régulation biologique des insectes ravageurs à l'échelle des paysages	116
Conclusion	119
8. Gestion des adventices par les régulations biologiques	121
Régulation des adventices par les plantes semées	122
Régulation par les organismes granivores	128
Conclusions.....	132
Partie III – Utilisation des microorganismes	133
9. Le microbiote des plantes : diversité, transmission et fonction	135
Diversité des microbiotes selon les habitats	135
Processus impliqués dans l'assemblage et la transmission des microbiotes.....	137
Impact du microbiote de la plante sur la <i>fitness</i> de son hôte	139
Vers l'utilisation du microbiote pour améliorer la croissance et la santé des plantes.....	141
10. Protection agroécologique pour le maintien de la santé des plantes.....	143
La production agricole et la gestion des bioagresseurs	144
De nouveaux leviers à explorer : les interactions plante-microbiote et leur place dans les écosystèmes agricoles	145
Vers un couplage entre microbiote et pratiques agroécologiques	148
11. L'utilisation des microorganismes comme produits de biocontrôle.....	151
La protection biologique : de nombreux microorganismes décrits.....	151
Produits commercialisés.....	152
Mode d'action des agents de biocontrôle microbiens	153
Facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle microbiens	158
Conclusion et perspectives	159
12. Les métabolites microbiens, acteurs du biocontrôle.....	161
Les rhamnolipides : des molécules aux nombreuses facettes	162
Les lipopeptides : biodiversité des structures et des activités	163

Les polycétones synthétisées par les agents de lutte biologique du genre <i>Pseudomonas</i>	166
Conclusion et perspectives	169
Partie IV – Les biopesticides d’origine végétales	171
13. Les substances naturelles d’origine végétale utilisées comme produits de biocontrôle	173
Biopesticide d’origine végétale, de quoi parle-t-on ?.....	174
Les biopesticides botaniques utilisés aujourd’hui comme produits de biocontrôle.....	176
Conclusion	183
14. Les défis à relever pour le développement de substances naturelles d’origine végétale	185
Démarche de valorisation des molécules issues des recherches sur les interactions plantes-bioagresseurs.....	187
Des verrous techniques à lever	191
Des effets secondaires à intégrer	193
Ces biopesticides sont-ils inoffensifs pour l’homme ?.....	195
Partie V – Médiateurs chimiques et lutte contre les insectes bioagresseurs	197
15. Médiateurs chimiques et communication chez les insectes	199
Les médiateurs chimiques régulent de nombreux comportements des insectes	199
Une extraordinaire diversité de médiateurs chimiques.....	200
Méthodes d’identification des signaux chimiques et d’analyse de leur perception	203
Conclusion	207
16. Anatomie et fonctionnement du système chimiosensoriel des insectes	209
Organisation neurophysiologique des systèmes chimiosensoriels	209
Mécanismes moléculaires de la détection chimiosensorielle.....	214
Codage nerveux des signaux chimiques	217
Plasticité chimiosensorielle	218
Conclusion	220
17. Médiateurs chimiques et lutte contre les insectes	221
Différentes utilisations des médiateurs chimiques pour le contrôle des insectes	222
Nouvelles perspectives	225
Conclusions.....	228
Partie VI – Les conditions de succès du biocontrôle et de son déploiement à large échelle	229
18. Le défi du déploiement du biocontrôle	231
Le déploiement à l’échelle du champ :	
quels facteurs de succès d’utilisation du biocontrôle ?	232
Le déploiement du biocontrôle à l’échelle du territoire.....	238
La diffusion de l’innovation dans la chaîne de valeur	240
19. Le biocontrôle : perspectives de structuration d’un secteur en développement	245
Comment parle-t-on du biocontrôle ? Une analyse à partir des discours scientifiques, médiatiques et institutionnels	246

Le biocontrôle : quelle place dans la transformation agricole ?.....	248
Le biocontrôle est-il réductible à une forme produit ?	252
La réglementation : un verrou inadapté pour les acteurs du biocontrôle, des incertitudes pour la société civile.....	253
Biocontrôle et mise sur le marché : vers des modèles d'affaires pluralistes	254
Conclusion : le biocontrôle, une innovation en devenir	258
20. Concevoir des systèmes de culture mobilisant le biocontrôle	261
Concepts et méthodes de l'agronomie systémique	262
Importance du caractère systémique des solutions de biocontrôle : quelques exemples	265
De nouvelles questions, de nouvelles méthodes et de nouvelles réglementations.....	269
Conclusion	273
21. Quelles technologies pour le déploiement du biocontrôle ?	275
La semence, cible de traitement et vecteur d'application pour le biocontrôle	275
Le défi de la formulation des substances et des organismes de biocontrôle.....	278
Les agroéquipements, la robotique et le numérique pour optimiser l'utilisation du biocontrôle.....	284
Conclusion	287
Partie VII – Le biocontrôle est-il une méthode de protection durable ?.....	289
22. Risques pour la santé et la biodiversité liés à l'utilisation d'un bioinsecticide majeur	291
Les biopesticides <i>Bt</i>	291
Y a-t-il des risques sanitaires liés aux produits <i>Bt</i> ?	292
Quelle(s) source(s) de contamination par <i>Bt</i> ?.....	294
Persistance de <i>Bt</i> dans l'environnement et le tractus digestif.....	295
Impacts de <i>Bt</i> sur l'environnement	296
Conclusion	296
23. Le développement de résistances aux produits de biocontrôle est-il possible ?	299
De nombreux agents de biocontrôle commercialisés, une efficacité variable sur le terrain	299
Adaptation des bioagresseurs à différentes méthodes de protection des plantes.....	300
Cas avérés de résistance de bioagresseurs à des agents de biocontrôle	300
Risque d'apparition de résistances aux agents de biocontrôle chez les bioagresseurs des cultures.....	302
Conclusion	304
Glossaire	307
Références bibliographiques	315
Liste des auteurs	372

Introduction

Christian Lannou

L'usage du terme « biocontrôle » est relativement récent. Une analyse rapide par le biais de Google Trend indique une utilisation régulière, et surtout croissante, depuis 2012. Sa popularité est largement liée à la prise de conscience des problèmes engendrés par l'emploi massif des pesticides de synthèse en agriculture et aux efforts qui sont déployés pour trouver des solutions alternatives. Pour autant, l'idée originelle, qui est d'utiliser les outils mis à notre disposition par la nature elle-même pour gérer les parasites et ravageurs des cultures, est très ancienne. Si ces approches « biologiques » sont restées relativement peu utilisées jusqu'à présent dans les contextes agricoles des pays industrialisés, c'est largement en raison d'un accès facile à des pesticides de synthèse efficaces et peu coûteux, dont les effets négatifs sur la qualité de l'environnement, sur la biodiversité, voire sur la santé humaine, n'étaient que rarement perçus par l'utilisateur. Mais le contexte a changé depuis une dizaine d'années, avec la publication de la directive européenne 2009/128/CE, qui s'est traduite en France par la mise en place du plan Écophyto. Quel que soit le succès à ce jour de ce plan, il faut reconnaître qu'il a permis de remettre à une place centrale la notion de durabilité des systèmes agricoles et de respect de l'environnement, et qu'il a conduit la recherche agronomique à ouvrir de nouvelles voies d'exploration et à réinvestir des domaines qui étaient devenus marginaux, mais qui seront sans doute les bases de la protection des cultures de demain.

Cet ouvrage fait la synthèse des recherches actuelles dans le domaine du biocontrôle et des méthodes de protection des cultures basées sur les régulations naturelles. Il présente un panorama critique des solutions qu'elles offrent ou offriront à l'agriculture. Y sont présentés à la fois les fondements conceptuels qui permettent de comprendre et de mobiliser les interactions biologiques dans les systèmes cultivés et les applications possibles qui sont imaginées ou déjà mises en œuvre. Bien sûr, la protection des plantes ne se résume pas au biocontrôle. Les autres approches, en particulier basées sur l'immunité végétale ou sur la prophylaxie, ne sont pas évoquées dans cet ouvrage.

La nécessité de protéger les cultures, mais autrement

La concurrence entre l'homme et les autres organismes, dont les agents pathogènes et les insectes, pour tirer bénéfice des plantes cultivées date certainement de l'apparition de l'agriculture (Stukenbrock *et al.*, 2007). En Occident, les références les plus anciennes sur les méthodes de protection des plantes datent des romains (Caton l'Ancien, env. 160 av. J.-C.). En France, l'histoire moderne de la protection des cultures émerge au XIX^e siècle suite à l'arrivée de bioagresseurs majeurs : introduction de l'oïdium à partir de 1845 et démonstration, puis généralisation de l'usage du soufre pour le contrôler, introduction du mildiou en 1878 et mise au point de la bouillie bordelaise au début des années 1880. On peut également noter la conception de méthodes ne faisant pas appel aux pesticides, comme l'échaudage contre la pyrale, mis au point durant la première moitié du XIX^e siècle par Benoît Racllet, et bien sûr le greffage de la vigne sur porte-greffe résistant pour lutter contre le phylloxéra, méthode proposée par Jules Émile Planchon, dont la statue inaugurée en 1894 fait toujours face à la gare de Montpellier.

Un changement majeur s'est cependant produit dans le monde agricole juste après la Seconde Guerre mondiale avec le développement d'une stratégie d'intensification de la production dont le but premier était de nourrir la population. Cet effort de l'ensemble des filières et de la recherche agronomique, soutenu par les politiques publiques, a permis l'augmentation régulière des rendements, jusqu'à atteindre l'autosuffisance alimentaire dans les années 1970, puis à dégager des excédents. La filière agroalimentaire française génère de nos jours le second excédent commercial derrière l'aéronautique, et les échanges de produits agricoles bruts sont bénéficiaires. Ces progrès considérables ont été rendus possibles grâce à des changements radicaux dans la structure des exploitations agricoles, au développement de la mécanisation, à l'accès à une fertilisation abondante et aux efforts intenses de sélection génétique pour obtenir des variétés plus productives.

L'intensification agricole a donc permis d'atteindre l'autosuffisance alimentaire, puis de contribuer au budget de la nation, et cela ne doit pas être oublié, mais elle a aussi contribué à fragiliser les cultures vis-à-vis des parasites et des ravageurs. En effet, le simple fait de constituer des peuplements très denses d'une même espèce ouvre la voie aux épidémies et aux proliférations de bioagresseurs. L'organisation moderne en grandes parcelles génétiquement homogènes et richement alimentées en azote ne fait qu'aggraver la situation, et c'est bien le recours à une protection systématique par les pesticides issus de la chimie de synthèse qui a résolu le problème... tout en en posant d'autres auxquels nous sommes maintenant confrontés.

L'usage des pesticides de synthèse s'est développé à partir de la Seconde Guerre mondiale pour les herbicides et les insecticides. Les fongicides de synthèse apparaissent dans les années 1960, puis se développent dans les années 1970, avec des matières actives systémiques et curatives. Ces produits, de plus en plus performants, ont permis de contrôler efficacement le développement des bioagresseurs et d'exprimer pleinement le potentiel de rendement des nouvelles variétés.

Ils ont ainsi accompagné la mise en place des systèmes de production intensifs en assurant une bonne maîtrise des risques sanitaires. Mais l'usage des pesticides est aussi devenu une technique sécurisante, voire même, pour certains analystes, une dépendance pour les agriculteurs (Bonnefoy, 2012 ; Valo, 2012). Leur utilisation massive a engendré deux problèmes majeurs. Le premier, d'ordre technique, est la sélection de résistances chez les organismes ciblés. Le second est l'impact sur l'environnement et la santé (Bonnefoy, 2012).

Cette question de l'impact environnemental et sanitaire des pesticides n'est pas récente, même si elle a pris beaucoup d'ampleur médiatique ces dernières années. On peut en dater la prise de conscience avec la parution, en 1962, du livre *Silent Spring* (*Printemps silencieux*, 1963) de la biologiste américaine Rachel Carson. Peu à peu, les pouvoirs publics ont interdit l'usage des molécules les plus dommageables (par exemple les insecticides organochlorés). Encore récemment, la découverte de l'effet subléthal des néonicotinoïdes sur les abeilles (Henry *et al.*, 2012) les a conduits à prendre des mesures d'interdiction sur certains de ces produits à l'échelle de la France et de l'Europe (règlement d'exécution n° 485/2013). Ces dernières années, l'attitude du public vis-à-vis de l'emploi des pesticides a fortement évolué et ne peut plus être ignorée par les producteurs. Les nombreux articles de presse sur des conflits de voisinage entre agriculteurs et riverains en donnent une idée. L'exigence de produits sans résidus de pesticides s'exprime ouvertement et oriente des choix de consommation, même si l'attitude générale des consommateurs reste paradoxale, avec une demande explicite de produits non traités, et une exigence implicite de fruits d'apparence irréprochable et bon marché dans les rayons des magasins.

Le biocontrôle : un regard neuf sur une approche ancienne

Le terme « biocontrôle » désigne un ensemble de méthodes de lutte contre les bioagresseurs des cultures basées sur l'utilisation de mécanismes naturels. Il fait l'objet d'une définition officielle (article L. 253-6 du Code rural et de la pêche maritime, modifié par l'article 50 de la loi n° 2014-1170) qui est en réalité un classement des produits de biocontrôle en quatre catégories : macroorganismes, microorganismes, médiateurs chimiques (tels que les phéromones) et substances naturelles permettant de lutter contre des ennemis des cultures. Cette définition normative permet des échanges sur une base claire entre praticiens, chercheurs, responsables des politiques publiques et législateurs.

Il ne faut cependant pas imaginer que la notion est nouvelle. Une composante majeure de ce qu'on appelle aujourd'hui le biocontrôle est la lutte biologique, qui consiste à utiliser un organisme auxiliaire pour lutter contre un organisme ravageur. Les premiers exemples de lutte biologique soutenus par une approche scientifique datent du XIX^e siècle et du tout début du XX^e siècle (chapitres 3 et 4). Il faut également avoir en tête que, au-delà de sa dimension scientifique, l'utilisation de régulations biologiques est mise en œuvre depuis toujours de manière empirique par les agriculteurs dans un contexte de subsistance et de production locale. Un bon exemple, évoqué au chapitre 20, est celui du jardin créole.

Ce qu'on cherche à faire, en redonnant une force nouvelle à l'idée d'utiliser des mécanismes naturels pour la protection des plantes, c'est de permettre à l'agriculture moderne de se réappropriier des possibilités dont elle a oublié l'existence dans le cadre d'un modèle qui l'a justement conduite à s'affranchir des contraintes biologiques par la fertilisation et la protection chimique. Que l'inspiration vienne de l'observation de la nature (on peut voir dans son jardin que la coccinelle se nourrit de pucerons) ou de l'analyse des savoirs paysans (par exemple sur l'utilisation de mélanges d'espèces à bénéfice réciproque), l'enjeu est bien de développer une recherche, dans ses dimensions académiques et finalisées, sur les approches de biocontrôle pour les mettre au service d'une agriculture productive, capable de nourrir la population et de faire vivre les familles de producteurs. Cet enjeu relève largement de la biologie et de l'ingénierie écologique, mais il comporte également une dimension sociologique et économique essentielle (présentée aux chapitres 18, 19 et 20). On ne peut pas simplement décider de remplacer des traitements chimiques par des solutions biologiques en conservant par ailleurs le même système de culture (voir en particulier le chapitre 20). La transition du chimique au biologique nécessite une reconception en profondeur des systèmes agricoles, qui reste largement à imaginer, à construire et à accompagner.

L'arsenal du biocontrôle

Mais revenons à la base du sujet : quels sont ces « mécanismes naturels » dont il est question ? La protection chimique est basée sur une idée simple et très efficace : on vous fournit un produit et une posologie ; ce produit est adapté à l'utilisation d'un pulvérisateur standard ; il ne vous reste qu'à revêtir une combinaison de protection et à l'appliquer en essayant de ne pas trop penser aux impacts à long terme sur l'environnement ni aux riverains de votre parcelle. En comparaison, le biocontrôle est un arsenal hétéroclite dont chaque composante est d'une efficacité partielle, impose des contraintes d'utilisation variables, avec un mode d'emploi qui reste en grande partie à inventer.

Pour autant, ces approches présentent des avantages très intéressants. En effet, un problème majeur des pesticides chimiques est qu'ils provoquent assez rapidement l'apparition de résistances au sein des populations qu'ils sont supposés contrôler (de même que les antibiotiques en médecine). Or, même si la durabilité des solutions de biocontrôle peut être questionnée (voir le chapitre 23), on a rarement vu un insecte développer une résistance à un prédateur. Il faut aussi considérer que l'apparition de résistance chez les bioagresseurs est liée à leur variabilité génétique et à leur capacité de mutation naturelle. Ce qui est un problème face à un pesticide chimique devient potentiellement un avantage en biocontrôle : les agents de lutte biologique ont aussi un pouvoir d'adaptation qui peut être exploité pour un contrôle durable (voir le chapitre 4).

D'autre part, la panoplie de solutions disponibles (ou qui le deviendront) permet de construire des systèmes de protection adaptés à différentes contraintes, avec des effets bénéfiques certains une fois que l'appropriation est réalisée et après une forme de reconception du système. Un exemple est celui de l'évolution de la culture sous serres dans la région d'Almeria (Espagne). Suite à un scandale sanitaire lié à

la présence de résidus de pesticides non autorisés dans des poivrons ayant conduit à un report des acheteurs européens sur d'autres sources d'approvisionnement, une conversion radicale vers l'utilisation du biocontrôle a été réalisée dans cette zone de production, conduisant au quasi-remplacement de la lutte chimique pour le contrôle des thrips. On estime que 70 % des agriculteurs locaux ont adopté cette approche, contre 4 % en 2006. Cette conversion s'est accompagnée d'une amélioration de l'expertise technique par la formation et d'un soutien financier de l'État (Anonyme, 2016). Elle a cependant aussi engendré des problèmes environnementaux et humains liés à une forme d'intensification nouvelle, qui nous rappellent que l'approche biologique de la protection des cultures, si elle présente des avantages indéniables, n'est pas intrinsèquement vertueuse (Mandard, 2019). La protection par biocontrôle sous serre connaît par ailleurs des succès remarquables. Par exemple, aux Pays-Bas, plus de 90 % de la production de tomates, de concombres et de poivrons se fait en protection intégrée associant biocontrôle, variétés résistantes et contrôle climatique.

Les raisons du succès de la lutte biologique en serre ne sont pas liées à une forme d'idéalisme des professionnels, qui ne prennent pas de risque sur une production à haute valeur ajoutée quand le coût d'un traitement pesticide reste minime. Les raisons invoquées sont plutôt une meilleure efficacité technique compte tenu de l'apparition de résistances aux pesticides, la possibilité d'utiliser des pollinisateurs dans les serres, l'absence de délai de retour ou de récolte, l'absence de phytotoxicité, une surveillance et une fréquence des interventions réduites, l'absence de risque pour les personnes en charge des traitements et l'attente des consommateurs. Le biocontrôle est alors perçu comme un système rentable, efficace et qui présente de nombreux avantages. Associée à la régulation climatique des serres et à la disponibilité de variétés résistantes, cette approche permet de construire un système cohérent de protection en milieu confiné, qui reste cependant difficile à extrapoler en milieu ouvert.

Cet arsenal du biocontrôle est décrit de manière très complète tout au long de l'ouvrage. Il comporte notamment les formes de lutte biologique (par introduction ou par augmentation), l'utilisation des régulations naturelles dans les paysages (ou lutte biologique par conservation), l'utilisation des microorganismes, ceux du microbiote qui favorisent la santé des plantes mais aussi les antagonistes microbiens ou les microbes pathogènes de bioagresseurs, l'utilisation de médiateurs chimiques qui permettent de tromper les sens des insectes, et l'ensemble des molécules naturelles ayant une action directe sur les parasites et les ravageurs.

La lutte biologique sous ses différentes formes

La première partie de l'ouvrage traite de la lutte biologique, qui est la composante la plus ancienne de ce qu'on appelle aujourd'hui le « biocontrôle ». Après des rappels conceptuels qui en détaillent les fondements scientifiques (chapitres 1 et 2), les différentes approches pratiques sont explicitées (chapitres 3, 4, et 5). La seconde partie, complémentaire, présente la lutte par conservation, c'est-à-dire la mobilisation des régulations naturelles dans les paysages cultivés (chapitres 6, 7, et 8) : il ne s'agit pas ici d'utiliser un organisme (auxiliaire) contre un autre (ravageur),

mais de favoriser, puis de laisser opérer naturellement, les relations de prédation et de parasitisme qui limitent les proliférations d'organismes dommageables aux cultures.

La lutte biologique par acclimatation consiste à identifier un auxiliaire, en général dans la zone d'origine du bioagresseur, puis à l'introduire dans la zone à protéger. Cela concerne en premier lieu les bioagresseurs invasifs, introduits accidentellement. La démarche (chapitre 3) implique :

- de réaliser un inventaire des ennemis naturels du ravageur dans son aire d'origine,
- de caractériser leur espèce (ce qui peut conduire à revoir en profondeur la systématique d'un complexe d'espèces morphologiquement très proches, mais ayant des spectres d'hôtes différents, voir le chapitre 1),
- de caractériser l'efficacité et le spectre d'hôtes de l'auxiliaire,
- d'évaluer les possibilités d'élevage et de le mettre en place,
- d'introduire l'auxiliaire sur le terrain et de suivre sa dynamique.

La lutte par acclimatation présente des avantages importants. Si l'introduction est réussie, l'effet est durable, n'induit pas de coûts importants par la suite et l'auxiliaire peut se développer sur des zones peu accessibles à l'homme. Quand les conditions sont réunies, elle peut être remarquablement efficace. Par contre, elle ne génère aucun profit commercial et sa mise en œuvre repose sur des organismes publics, en collaboration avec les partenaires et les filières concernées. Un bon exemple, explicité au chapitre 3, est l'introduction du parasitoïde *Torymus sinensis* pour lutter contre le cynips du châtaignier.

La lutte biologique par augmentation, décrite au chapitre 4, est basée sur la production industrielle de l'auxiliaire qui est ensuite introduit en masse sur la zone à protéger, par exemple dans une serre, dans le but d'obtenir un effet immédiat. Elle est adaptée à la lutte contre un bioagresseur endémique et se substitue alors à une lutte chimique classique. Il s'agit d'une approche en plein développement, avec un marché en croissance soutenue, mais qui se concentre largement sur les cultures sous abris à forte valeur ajoutée. Le nombre de nouvelles espèces d'auxiliaires commercialisées a fortement augmenté jusque dans les années 1990, puis a décliné après 2000, en raison notamment de la mise en place de règlements sanitaires plus contraignants pour l'importation et l'introduction d'espèces exotiques, ce qui a conduit à restreindre la recherche d'auxiliaires aux organismes endémiques à la région concernée.

Ces approches de lutte biologique peuvent sembler au premier abord relativement classiques, mais les différents chapitres qui leur sont consacrés, ainsi que les chapitres 18 à 21, montrent à quel point leur développement actuel et l'amélioration de leur efficacité reposent sur des efforts scientifiques et technologiques essentiels. Il s'agit bien d'utiliser les avancées conceptuelles les plus récentes et les technologies les plus modernes pour développer des solutions basées sur la compréhension et la maîtrise des systèmes biologiques. En ce sens, un des exemples les plus marquants est celui de la technique de l'insecte stérile (TIS), décrite au chapitre 5.

Enfin, on peut généraliser l'idée d'une régulation biologique permanente à l'échelle des paysages cultivés en utilisant les principes de l'écologie des communautés et de la lutte biologique par conservation, qui consiste à favoriser le maintien et le développement des populations d'auxiliaires, par exemple en aménageant les zones cultivées, en modifiant certaines pratiques culturales, en introduisant des plantes de service ou en préservant des zones refuges. Les chapitres 6, 7, et 8 explicitent bien l'importance de fonder les recommandations sur des connaissances produites dans le cadre scientifique de l'écologie des communautés, mais montrent aussi comment, en retour, les questions soulevées par leur mise en pratique interrogent cette discipline et ses attendus théoriques, par exemple sur le lien entre fonctionnement et structure des réseaux trophiques à l'échelle des paysages.

Les approches basées sur les microorganismes

Il est maintenant reconnu que les plantes sont associées à un microbiote et que celui-ci influe sur leur santé. Les outils modernes de génomique et de biologie fonctionnelle permettent actuellement des progrès considérables dans la compréhension des règles d'assemblage de ces microbiotes et de leur interaction avec la plante, sa physiologie, et en particulier son immunité. Ces approches renouvellent également la compréhension des antagonismes microbiens susceptibles de limiter le développement d'agents pathogènes, dont certains exemples, comme celui des sols suppressifs, sont connus de longue date.

Les chapitres 9 et 10 explicitent les approches mobilisées par l'écologie des communautés microbiennes pour aborder ces questions et développent les perspectives qui en sont issues en matière de protection des cultures et de gestion agroécologique des espaces agricoles. Ici également, le potentiel d'application est très fort et devrait aller bien au-delà des quelques exemples de souches commercialisées comme agents naturels protecteurs ou bénéfiques pour permettre d'envisager une véritable gestion de l'environnement microbien des cultures. Le défi scientifique reste ici largement posé mais les développements actuels sont très prometteurs.

Il se passera encore un peu de temps avant que la gestion du microbiote prenne une dimension pratique en agriculture, mais l'utilisation de souches microbiennes ou de molécules produites par les microbes est déjà une réalité. Les chapitres 11 et 12 font une synthèse sur les organismes et les produits concernés, sur les conditions et les limites de leur utilisation.

Comme pour les insectes, on trouve des exemples d'utilisation de microorganismes en biocontrôle dès la fin du XIX^e siècle et des recherches sur le sujet ont été produites tout au long du XX^e siècle. Cependant, l'intérêt pour ce type de solution a été renouvelé ces dernières années et on compte actuellement plus de 200 souches de microorganismes autorisées en biocontrôle au niveau mondial. Développer des solutions opérationnelles efficaces demande toutefois des efforts de recherche pour comprendre les modes d'action impliqués (antibiose, hyperparasitisme, stimulation de l'immunité végétale, compétition, etc.) et les conditions d'efficacité en production.

Les biopesticides d'origine végétale

L'utilisation d'extraits végétaux est un moyen de biocontrôle utilisé depuis des millénaires en agriculture et le retrait progressif de familles entières de pesticides chimiques renforce l'intérêt pour ces substances naturelles. Les chapitres 13 et 14 explicitent ce que sont ces produits et quels sont les défis à relever pour en développer l'usage. Certains, comme les pyrèthres, sont bien connus et ont même inspiré la mise au point de molécules de synthèse, mais le potentiel de développement de nouveaux biopesticides d'origine végétale reste important. Ces produits sont populaires auprès du grand public mais leur développement suscite plusieurs défis en recherche et développement : diversifier les produits efficaces, faciliter leur production, adapter leur formulation, mais aussi identifier les effets non intentionnels.

Les médiateurs chimiques et l'écologie olfactive

D'autres types de composés chimiques ont déjà une importance notable dans le domaine du biocontrôle, mais sont appelés à jouer un rôle croissant : ce sont les médiateurs chimiques (phéromones, kairomones, etc.) qui régulent le comportement de nombreux organismes. Les chapitres 15, 16 et 17 font le point sur la nature de ces molécules et leur rôle dans la biologie des insectes, puis explicitent les possibilités d'utilisation en biocontrôle. Il s'agit ici d'attirer les insectes dans un piège ou de brouiller la piste qui les conduit à un partenaire sexuel ou à une plante hôte. Cela mobilise des recherches allant de la génomique à l'écologie chimique en passant par l'analyse comportementale. Le développement des approches de génomique permet maintenant une écologie chimique inverse, qui part de l'analyse du génome et de l'identification des protéines codées pour remonter directement aux molécules odorantes qui activent les récepteurs olfactifs. On voit bien comment le biocontrôle par les médiateurs chimiques peut progressivement se substituer à la lutte par les insecticides chimiques en grande culture. Mais il s'agit aussi d'une approche très complémentaire d'autres méthodes, comme l'usage de plantes de service attractives ou répulsives.

Passer à la pratique...

Enfin, si les laboratoires progressent chaque jour sur la connaissance des systèmes biologiques, passer d'une preuve de concept à une solution opérationnelle requiert de travailler sur les conditions d'efficacité, d'adoption et d'utilisation du biocontrôle dans les systèmes de cultures. Ces aspects sont développés dans les chapitres 18 à 21, qui abordent à la fois les aspects techniques, réglementaires, économiques et organisationnels. Une idée majeure est ici que le biocontrôle ne viendra pas se substituer à la lutte chimique mais s'intégrera dans le cadre d'une reconception en profondeur des systèmes de cultures, qui seule permettra la transition agroécologique et l'émancipation vis-à-vis des pesticides de synthèse.

Pour finir, il faut rappeler que les approches biologiques ne sont pas *a priori* sans défaut et pourraient potentiellement poser des problèmes vis-à-vis d'organismes non-cibles, causer des proliférations incontrôlées ou s'avérer peu durables face

à la capacité d'évolution d'un bioagresseur. Il ne faut en effet pas oublier que naturel ne signifie pas sans danger et qu'un composé actif utilisé à large échelle a potentiellement des effets indésirables pour les organismes non-cible (dont l'homme). Même si on s'accorde pour estimer que ces risques potentiels liés à l'utilisation du biocontrôle sont bien moindres que ceux, avérés et majeurs, posés par les pesticides de synthèse, il faut maintenir un principe de précaution. Nous terminons donc par deux chapitres (22 et 23) qui évoquent ces questions.

Des défis à relever

De manière générale, et cela transparaît tout au long de l'ouvrage, le développement du biocontrôle nécessite des recherches, en systématique, en écologie, sur la démogénétique des petites populations, sur les grandes fonctions biologiques des organismes concernés (olfaction, symbiose, immunité, etc.), sur les mécanismes d'interaction entre plantes, microbes, bioagresseurs et organismes régulateurs. Il demande aussi des développements méthodologiques qui permettront d'apporter des solutions opérationnelles et une reconception des systèmes de cultures pour les intégrer.

Les organismes utilisables en biocontrôle sont potentiellement nombreux mais leur utilisation pose des problèmes de production, de conditionnement et d'application qui restent largement à résoudre. Les questions soulevées relèvent de l'ingénierie et nécessitent une interaction entre recherche et industrie, sur des sujets qui ne concernent pas uniquement la biologie mais aussi, par exemple, la chimie ou la robotique.

Les performances des organismes utilisés en lutte biologique varient d'un individu à l'autre au sein d'une espèce donnée. Le choix des souches ou des lignées les plus efficaces pour lutter contre un bioagresseur nécessite la mise au point de méthodes de phénotypage pour mesurer les comportements et les caractères à sélectionner. Cette question est encore à peine abordée mais pourrait conduire à accroître significativement le potentiel du biocontrôle.

En poussant le raisonnement, on peut imaginer améliorer ces organismes. Cela soulève des questions déontologiques et d'acceptabilité, mais la sélection classique est ici une possibilité, aussi bien que la transformation génétique. Sans aller aussi loin, un grand avantage des organismes biologiques est leur potentiel de diversité naturelle, qui pourrait permettre de résoudre la question de l'apparition de résistances chez les organismes ciblés. Le cas s'est déjà présenté pour un virus entomopathogène, avec la mise au point d'un virus de seconde génération capable d'infecter des lignées de carpocapses ayant développé une résistance à la souche d'origine (voir le chapitre 23).

Les approches de biocontrôle sont en général très spécifiques. C'est un avantage important qui permet la préservation des espèces non-cibles, mais aussi un inconvénient, car les plantes cultivées sont attaquées par une multiplicité de bioagresseurs. Plutôt que de raisonner sur la base d'une culture ou d'un bioagresseur particulier, il sera nécessaire de développer une vision holistique du système agricole, intégrant l'ensemble des processus écologiques bénéfiques, quelle que soit leur

échelle (du paysage à la plante), dans l'objectif de construire des environnements suppressifs pour les bioagresseurs. Il s'agira d'associer des aménagements paysagers favorisant la présence d'auxiliaires avec l'utilisation de plantes de service, de pièges à phéromones, d'insecticides naturels, etc. La production agricole bénéficierait alors d'un ensemble de services écosystémiques associés aux régulations naturelles, en plus des actions de biocontrôle spécifiques.

La transition vers le biocontrôle ne sera pas un simple remplacement d'une technologie par une autre. Le changement sera plus profond et nécessitera de considérer le système de production dans son ensemble, les systèmes de culture utilisant actuellement de nombreuses méthodes partiellement ou totalement incompatibles avec le biocontrôle. Un dialogue doit donc s'établir entre spécialistes du biocontrôle et agronomes pour reconcevoir les systèmes de cultures en vue d'intégrer le biocontrôle.

La lutte biologique est maintenant largement utilisée dans des serres de haut niveau technologique et en milieu tempéré, systèmes qui bénéficient d'une séparation avec le milieu extérieur et qui sont confrontés à des bioagresseurs dont certains survivent peu ou mal à l'extérieur en hiver. Par contre, le passage en milieu ouvert, et particulièrement sur les vignes, les vergers et les surfaces importantes des grandes cultures, reste un défi majeur à relever.

La construction de paysages favorisant les régulations biologiques est un enjeu pour la protection des cultures. Les pullulations de bioagresseurs résultent largement de la mise en place des pratiques agricoles modernes, avec de larges parcelles très homogènes et une réduction des interfaces avec les réservoirs de biodiversité. Agir à l'échelle du paysage devrait donc permettre de diminuer le niveau de risque général au bénéfice particulier de chaque praticien. Cela soulève des questions de fond en écologie des communautés, mais aussi en termes de politiques publiques et d'organisation des acteurs.

Le défi va en effet au-delà de la dimension technique du système de production et doit impliquer les différents acteurs, jusqu'au consommateur lui-même. Les dimensions économique, sociale et politique des innovations et des changements attendus restent largement à explorer. L'évolution de l'organisation des filières, de la réglementation, des politiques publiques, etc., qui permettront de transformer la protection des cultures, sont des questions à traiter.

En raison du changement climatique et de l'intensité des échanges entre continents, les introductions de bioagresseurs exotiques sont de plus en plus fréquentes. Les stratégies d'éradication officielles sont largement basées sur l'usage de pesticides et l'arme chimique peut sembler ici *a priori* plus efficace. Mais, tout en étant dommageable pour l'environnement, elle n'est aucunement une garantie de succès. On peut citer par exemple le cas de la chrysomèle du maïs, introduite en France en 2002, et dont les tentatives d'éradication ont échoué. La lutte biologique a ici un rôle important à jouer, et il existe plusieurs exemples de réussites notables (Cock *et al.*, 2016), mais on reste loin de pouvoir apporter une réponse efficace à la majorité des bioagresseurs introduits. Anticiper l'arrivée de bioagresseurs exotiques et préparer en amont des possibilités de lutte biologique est un enjeu stratégique pour notre agriculture.

Combiner le biocontrôle avec les autres méthodes de gestion de la santé des plantes

Le schéma classique de la protection intégrée est une forme de gestion de la parcelle qui associe différentes pratiques phytosanitaires et les intègre dans l'itinéraire cultural. Cela permet en particulier de prendre en compte les leviers agronomiques propres à réduire les incidences de bioagresseurs. Ce type d'approche est clairement utile et doit être promu, mais on peut dire qu'il est passé dans la pratique sans pour autant résoudre le problème général de la dépendance aux pesticides chimiques. Le succès est ici souvent local, porté par un agriculteur ou un groupe d'agriculteurs innovants. Encore faut-il le resituer dans le contexte d'un modèle économique et organisationnel qui n'est pas forcément généralisable.

Dans une perspective agroécologique, un élément clé pour le futur est l'intégration des leviers à notre disposition pour protéger les cultures. Il faut construire une protection associant les différents moyens offerts par l'arsenal du biocontrôle, mais cela ne suffira pas, en particulier pour contrôler les agents pathogènes. Au biocontrôle, il faudra associer un choix variétal fondé sur une gestion durable et efficace des variétés résistantes, ainsi que des pratiques agronomiques prophylactiques et propres à maintenir des rendements élevés. Il faudra également envisager des changements d'échelle pour étendre la gestion sanitaire de la parcelle au paysage cultivé. La dynamique des populations de bioagresseurs se détermine en général à des échelles supérieures à la parcelle et on ne peut pas résoudre un problème général par une action locale, sans raisonnement d'ensemble.

Une telle évolution de la protection des cultures requiert à la fois une approche pluridisciplinaire, associant par exemple dynamique des populations et économie, et la prise en compte des échelles biologiques les plus pertinentes. C'est ici que réside le défi posé à la recherche, aux instituts techniques et aux réseaux d'acteurs.

