

Vers une agriculture européenne sans pesticides

Trois scénarios à l'horizon 2050

O. Mora, J.-A. Berne, J.-L. Drouet,
C. Le Mouël, C. Meunier, coord.



Vers une agriculture européenne sans pesticides

Trois scénarios à l'horizon 2050

Olivier Mora, Jeanne-Alix Berne, Jean-Louis Drouet,
Chantal Le Mouël, Claire Meunier, coord.



Éditions Quæ

Dans la même thématique aux éditions Quæ

Pesticides en viticulture. Usages, impacts et transition agroécologique

Francis Macary, coord., Stéphane Le Foll, préface, coll. « Savoir faire », 2023, 232 p.

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., coll. « Synthèses », 2022, 244 p.

Pesticides. Des impacts aux changements de pratiques

Edwige Charbonnier, Aïcha Ronceux, Anne-Sophie Carpentier, Hélène Soubelet, Enrique Barriuso, coord., coll. « Savoir faire », 2015, 400 p.

Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux

Expertise scientifique collective Inra, coll. « Matière à débattre et à décider », 2011, 136 p.

Pour citer cet ouvrage

Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouël C., Meunier C. (coord.), 2025. *Vers une agriculture européenne sans pesticides. Trois scénarios à l'horizon 2050*, Versailles, éditions Quæ, 342 p., DOI : 10.35690/978-2-7592-3779-1

Sauf indications contraires, les figures sont des auteurs.

Toutes les références numériques et liens hypertextes mentionnés dans cet ouvrage ont été vérifiés et étaient actifs à la date du 17 janvier 2025.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0.



Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

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

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-3778-4

ISBN PDF : 978-2-7592-3779-1

ISBN epub : 978-2-7592-3780-7

ISSN : 2115-1229

Sommaire

Préface	5
Prospective : un collectif de travail	13
Remerciements	14
Introduction	15
1. L'enjeu du retrait des pesticides chimiques des systèmes agricoles et alimentaires	21
1. Les impacts négatifs des pesticides chimiques sur l'environnement et la santé humaine	21
2. Les bioagresseurs et la protection des cultures	27
3. Les évolutions passées des stratégies de protection des cultures	32
2. Les leviers possibles de protection des cultures pour des systèmes de culture sans pesticides chimiques	44
1. Six modes d'action pour une protection des cultures sans pesticides chimiques	44
2. Les signaux faibles pour la protection des cultures et les effets potentiels du changement climatique à long terme	75
3. Trois hypothèses de rupture pour une protection des cultures et des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050	93
3. Les changements nécessaires dans les autres dimensions du système alimentaire en 2050	125
1. Quelles structures des exploitations agricoles en Europe pour mettre en œuvre des systèmes sans pesticides chimiques en 2050 ?	125
2. Les agroéquipements et les technologies numériques pour des systèmes agricoles sans pesticides chimiques en 2050	143
3. Des chaînes de valeur pour une agriculture sans pesticides chimiques en 2050	148
4. Les scénarios et les trajectoires de transition pour une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050	161
1. Scénarios et trajectoires de transition	161

2. Les enjeux des trajectoires de transition vers un système alimentaire sans pesticides chimiques : politiques publiques, systèmes de connaissance et d'innovation agricoles et changements de régimes alimentaires	181
5. Les impacts des scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en Europe et dans le monde	202
1. La traduction des scénarios en valeurs quantitatives pour les variables et paramètres d'entrée du modèle	202
2. Les résultats de simulation	222
3. Les principaux enseignements	235
6. Des trajectoires de transition dans quatre régions européennes	241
1. Vue d'ensemble des régions et des filières étudiées	242
2. Une filière blé dur sans pesticides chimiques en 2050 en Toscane (Italie)	243
3. La filière maraîchère sans pesticides chimiques dans le sud sud-est de la Roumanie en 2050	249
4. La filière céréales et oléagineux dans le sud de la Finlande en 2050	255
5. La filière viti-vinicole dans le Bergerac Duras en 2050	261
7. Les enseignements des scénarios	268
1. Forces et faiblesses des trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques	268
2. Une analyse transversale des systèmes de culture dans les trois scénarios	272
3. Les enseignements des simulations des impacts des scénarios sur la production agricole et le commerce, les changements d'usage des terres et les émissions de gaz à effet de serre en Europe	280
4. Pour une stratégie robuste de transition vers une agriculture sans pesticides chimiques à l'horizon 2050	282
5. Les dix messages clés de l'étude prospective	284
Annexe 1. La méthode de la prospective « Agriculture européenne sans pesticides en 2050 »	286
Annexe 2. Le modèle GlobAgri-AE2050	294
Annexe 3. Listes des experts contributeurs	300
Liste des auteurs	304
Bibliographie	306

Préface

Au moment de la rédaction de cette préface, le monde agricole français et européen connaît un nouveau temps de tensions sociales, manifestant son inquiétude face aux changements à affronter. Et parmi les motifs clairement exprimés, la question des pesticides revient toujours et de façon lancinante. La publication du fruit d'une réflexion prospective orientée vers une agriculture sans pesticides peut donc apparaître comme profondément décalée vis-à-vis des attentes du monde agricole.

Et pourtant, il n'en est rien, bien au contraire. La prospective qui a été conduite de façon remarquable et avec des résultats très remarquables lors de sa publication au printemps 2023 est absolument indispensable pour préparer la protection des cultures de demain, tout en fournissant des éléments pour la conduite aujourd'hui.

Le thème de cette prospective est donc d'une acuité extrême et d'une pertinence totale, car il s'agit bien de préciser les conditions de la protection des cultures au milieu de ce siècle, protection des cultures qui doit assurer une performance productive pour fournir une alimentation saine et accessible à tous ; et environnementale, pour préserver, et même restaurer la biodiversité et tous les services qu'elle apporte à l'agriculture. Il faut de plus que la trajectoire de transition vers ces futurs possibles soit viable.

Une protection des cultures indispensable pour assurer une production de qualité et accessible à tous

En l'absence de protection des cultures, les pertes de rendement et de qualité peuvent être fortes, variables entre lieux et entre années, et imprévisibles. La protection des cultures contre les adventices, les champignons et les insectes est donc absolument indispensable. Elle repose aujourd'hui, et ceci depuis quelques décennies seulement, sur un usage massif de produits phytopharmaceutiques, même si le suivi longitudinal de l'usage des produits de protection des cultures sur les quinze dernières années montre des transitions marquées, avec une disparition des produits cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques les plus dangereux (CMR1) et une réduction de 57 % des CMR2¹, une trajectoire de réduction des autres produits de synthèse, et une augmentation continue de l'utilisation des produits de biocontrôle de 187 % en 15 ans. Aujourd'hui, on mesure clairement les limites d'une stratégie employant de grandes quantités de produits de synthèse. Ils ont un impact sur la santé humaine, la

1. Le règlement européen CE n° 1272/2008 (*Classification, Labelling and Packaging*) propose deux catégories de dangers (1 et 2) définissant le niveau de preuve de l'effet cancérigène, mutagène ou toxique pour la reproduction (CMR) observé.

qualité de l'eau et de l'air et ainsi que sur la biodiversité, et ceci conduit à des dynamiques de retrait potentiellement rapides, pouvant laisser les agriculteurs démunis si ce processus n'a pas été anticipé. Pour les substances actives massivement utilisées et relevant d'un même mode d'action, des phénomènes de résistance apparaissent. C'est le cas pour nombre d'herbicides ainsi que pour des insecticides. Ces substances deviennent alors inefficaces et le maintien de leur utilisation ne fait qu'accélérer la généralisation des populations résistantes, avec des effets collatéraux comme le retour de l'ergot du seigle dans les productions de céréales en 2024, ergot qui se développe sur les graminées adventices résistantes aux herbicides. Enfin, nous observons une quasi-absence de nouvelles options chimiques, faute de découverte de nouveaux modes d'action. Donc, il est impératif de chercher ailleurs, vers des systèmes de production où la pression des bioagresseurs est plus faible, vers de nouveaux modes de protection, vers des variétés résistantes ou encore vers des agroéquipements d'une nouvelle génération. L'exploration des futurs possibles est la fonction première d'une prospective. Dans le cas présent, ceci a été fait à l'échelle européenne, car la problématique posée est commune à l'ensemble des pays européens, qui partagent la même pharmacopée, les mêmes productions agricoles et les mêmes pressions parasitaires. Si on pointe parfois nos différences sous la forme des distorsions réglementaires, c'est oublier l'importance de ce que nous avons en commun. De ce point de vue, la prospective, en faisant le choix d'une visée européenne, s'inscrit une fois encore dans le sens de l'histoire.

Pourquoi cette prospective dans le cadre du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement » ?

Ce travail de prospective a été conduit dans le cadre du programme prioritaire de recherche (PPR) « Cultiver et protéger autrement », programme national soutenant la recherche académique pour explorer des questions de recherche totalement originales en matière de protection des cultures. Ce programme a été élaboré, et validé par le ministère de la Recherche en 2020, autour d'un scénario totalement disruptif, et non prescriptif, celui de l'absence d'utilisation de produits phytopharmaceutiques de synthèse. Pourquoi un tel scénario disruptif ? Comme cela est expliqué dans l'ouvrage *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*², le fait de poser un tel paradigme a forcé la recherche académique à explorer des fronts de recherche nouveaux, au travers de dix projets sélectionnés par un jury international et prévus sur une durée de six ans. Ces fronts de science, comme l'écologie chimique ou le microbiote végétal, et leur intégration dans des systèmes sociotechniques révisés, pouvaient apparaître comme totalement inatteinables. Et pourtant, le bilan des avancées à mi-parcours montre bien que cette stratégie

2. Publié en 2022 aux éditions Quæ en langue française ; puis en langue anglaise en 2024 sous le titre *Towards pesticide-free agriculture. Research and innovations in a future crop protection paradigm*, également aux éditions Quæ.

s'avère réellement gagnante, offrant des options d'application à relativement court terme, et permettant aussi à la recherche française d'occuper les premières places européennes et mondiales dans les travaux sur la protection des cultures. Pour autant, ce scénario du zéro pesticide posé à la recherche n'est pas un scénario prescriptif. Il n'est pas dans l'objectif de ce programme de dire aux agriculteurs de se passer de toute molécule chimique demain. Les avancées permettront cependant d'élargir le champ des options, de contribuer à la démarche d'anticipation et d'éviter les impasses engendrées par des retraits, ainsi que d'identifier les conditions dans lesquelles une trajectoire ambitieuse peut être suivie.

Le travail de prospective a cherché à explorer toutes les options futures pour une protection durable des cultures, sans entrer dans le détail de différentes productions, mais en ayant une approche à l'échelle de toute la chaîne de valeur. C'est un choix particulièrement important. En effet, l'évolution des pratiques de protection des cultures et toutes ses incidences ne peuvent pas reposer sur les épaules des seuls agriculteurs. Il est inconcevable que l'on demande aux agriculteurs une évolution des pratiques de protection des cultures et des systèmes agricoles, tout en donnant simultanément une injonction paradoxale, en provenance des marchés, selon laquelle il faudrait produire les mêmes quantités de chaque matière première, et au même prix, voire à des prix toujours plus bas.

En conséquence, l'équipe qui a conduit ce travail de prospective a fait le choix d'une approche large. Ceci a permis d'identifier les conditions nécessaires pour permettre aux différents scénarios de pratiques et systèmes de protection des cultures de voir le jour. Ces conditions relèvent de trois grands champs.

1. Il s'agit d'abord de celui des innovations nécessaires dans les leviers de protection, et donc des connaissances à produire, si elles ne sont pas déjà disponibles. Ainsi, cette prospective donne une véritable feuille de route à la recherche et entre en résonance profonde avec les projets de recherche du PPR, et bien au-delà avec la programmation de la recherche en France et en Europe.
2. Il s'agit ensuite de la mobilisation de la chaîne de valeur et de l'évolution des comportements des acteurs et des consommateurs. La prospective explore ainsi comment les évolutions de consommation et la possible réduction des pertes et gaspillages (qui sont encore malheureusement aujourd'hui au-dessus de 30 % de la biomasse récoltée) offrent des marges de manœuvre pour repenser la protection des cultures.
3. Enfin, ce sont les politiques publiques qui sont mobilisées, comme de grands leviers de transformation, et notamment la cohérence entre les politiques agricoles, les politiques environnementales et les politiques de consommation, ainsi qu'entre les échelles européennes, nationales et régionales.

Quelques points remarquables du déroulement de cette prospective et de ses résultats

Alors que vous allez bientôt découvrir dans les pages qui suivent toute la richesse des enseignements de ce travail conduit sur plus de deux ans, je ne vais pas en faire un résumé. Je préfère livrer ici une analyse de quelques points remarquables.

Il existe tout d'abord une grande diversité des experts mobilisés qui assure une richesse et une complémentarité des regards. En effet, le principal risque d'une prospective est de se faire piéger par les effets de fixation, qui limitent les libertés que l'on se donne pour concevoir. La diversité des disciplines convoquées a été forte, de même que les horizons de métiers des experts. Plus encore, la diversité européenne a été une vraie ressource. Dans le même temps où se mettait en place cette prospective, une alliance européenne de recherche se mettait en place sous le titre « Vers une agriculture sans pesticides ». Elle regroupe aujourd'hui 38 organismes de recherche, académique ou appliquée, issus de 21 pays européens. Cette diversité de regards européens permet de prendre en compte la pluralité des situations géographiques, économiques et culturelles. Au long du projet, elle a constitué une source d'options nouvelles, mais aussi un défi de chaque instant pour les pilotes de ce travail. Que tous ces experts soient ici remerciés pour leur temps, leur contribution intellectuelle, leur créativité et leur adhésion à cet exercice qui n'a rien de simple !

Au fil des pages, vous allez découvrir une prospective qui a une structure originale, très différente de la structure d'une majorité de prospectives. En effet, il n'y a aucun scénario qui fasse l'hypothèse d'un statu quo, traduisant la continuation de la trajectoire existante. Cette hypothèse n'aurait pas de sens, car elle supposerait l'arrêt des processus réglementaires, ce qui est toujours possible, et l'arrêt des processus biologiques d'émergence de résistances et d'arrivée de nouveaux bioagresseurs, ce qui est là tout à fait impossible. L'autre possibilité pour une hypothèse de statu quo aurait été de poursuivre les processus réglementaires de retrait et de laisser faire les processus biologiques de résistance, conduisant à un scénario d'absence totale d'options de protection des cultures. Or, comme il est dit plus haut, la protection des cultures est obligatoire. En cohérence avec cela, l'ensemble des trois scénarios répondent à une même trajectoire qui consiste à passer d'une protection des cultures massivement réalisée par une lutte curative à une protection des cultures préférentiellement basée sur la prévention et la généralisation de la prophylaxie, la lutte curative reposant sur le biocontrôle ou les agroéquipements étant également mobilisée. Ainsi, en mettant la prophylaxie comme principe premier, les trois scénarios présentés posent un principe de changement paradigmatique fort.

Il est donc proposé trois scénarios globaux, qui ont une forte cohérence interne et sont obtenus par la combinaison d'options, dans chacun des compartiments de la chaîne de valeur. Ceci donne des constructions faciles à comprendre, et offre aussi la possibilité de combinaisons supplémentaires. Ainsi, en matière de leviers de protection des cultures, il est possible de combiner, au moins partiellement, les trois options puisqu'elles sont complémentaires, en visant principalement la maîtrise des adventices au travers des options mécaniques et numériques, la mobilisation de l'immunité végétale par le levier génétique, la maîtrise des maladies fongiques par la connaissance et l'utilisation du microbiote ou encore la régulation des insectes grâce aux paysages olfactifs. Les scénarios deviennent alors une source d'inspiration et une ressource de

leviers qu'il est possible de décliner plus précisément pour les différentes filières de production et les différents contextes économiques ou locaux.

Ces différents scénarios ont fait l'objet d'un chiffrage dans les dimensions productives et environnementales. Ceci a permis de quantifier les incidences de ces scénarios dans le champ des émissions de gaz à effet de serre, en les comparant à la situation actuelle. De même, une estimation des incidences sur les échanges de biomasse agricole et alimentaire a été réalisée et permet de démontrer que des scénarios cohérents correspondant à des évolutions profondes des modes de production et de consommation ne dégradent pas la souveraineté alimentaire et peuvent même conduire à l'améliorer. Ce n'était pas une contrainte imposée lors des étapes de conception, mais c'est tout de même une bonne nouvelle d'y parvenir !

Le travail de prospective est allé plus loin dans une démarche originale de mise en situation, en illustrant les différents scénarios dans quatre territoires européens : un territoire viticole en France, la production de blé dur en Toscane (Italie), la production légumière en Roumanie et de blé tendre en Finlande. Ce travail décliné au travers d'ateliers avec les acteurs de terrain s'est avéré très fertile. Il illustre deux dimensions majeures, et essentielles. D'une part, les mises en situation montrent sans ambages qu'il faut une mobilisation simultanée des différentes dimensions techniques, organisationnelles et de politiques publiques. Elles mettent aussi en évidence l'importance d'imaginer une trajectoire longue dans le temps. Ceci alimente la réflexion selon laquelle une visée à long terme d'une réduction forte de l'usage des pesticides peut apporter, tout au long de la trajectoire de transition, des outils, pratiques et méthodes permettant aux agriculteurs et aux autres acteurs de la chaîne de valeur de mobiliser de nouveaux modes de protection des cultures, sans jamais mettre en péril la viabilité économique.

L'ensemble de ce travail s'est déroulé en étroite collaboration avec les différents projets du PPR et avec les animations déployées par ses pilotes scientifiques, dans des colloques annuels pour le monde de la recherche ainsi que dans des rencontres chercheurs-professionnels à travers la France. Il s'est aussi articulé avec l'expertise scientifique collective « Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles » (RegulNat) sur la contribution des régulations naturelles à la protection des cultures. Ceci a conduit à des échanges continus et fertiles. Ainsi, le scénario 3 a pu se confronter et s'enrichir des travaux conduits dans le cadre du projet Phero-Sensor sur l'écologie chimique et des conclusions de RegulNat montrant l'intensité croissante des régulations naturelles avec l'augmentation de la diversité à l'échelle des couverts, des parcelles et de leur environnement proche, ainsi que des paysages. De même, le scénario 2 s'est nourri des avancées rapides sur la connaissance des microbiotes végétaux (Deep impact, Vitae et Sucseed³) et leurs possibles fonctions de régulation. Enfin, le scénario 1 a bénéficié des progrès en matière de

3. Pour plus d'informations sur les projets, voir : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets>

génétique de l'immunité, mais aussi des avancées en matière de robotique et de numérique venant d'une part du programme et équipement prioritaire de recherche « Agroécologie et numérique » et d'autre part du Grand défi Robotique agricole. En cela, ce travail de prospective a illustré la contribution possible d'une prospective dans les grands programmes de recherche qui structurent aujourd'hui le paysage de la recherche académique française.

Un encouragement à poursuivre

La mobilisation forte en France et en Europe sur ce projet et les résultats passionnants qui ont été produits et dont cet ouvrage est la traduction sont un encouragement à la poursuite et à l'approfondissement des réflexions. Les axes d'enrichissement ne manquent pas. Je n'en citerai que trois.

La première voie d'enrichissement pourrait être celle du chiffre économique. Elle est complexe à parcourir, car tributaire des marchés et donc des hypothèses relatives aux échanges et aux évolutions de production ailleurs dans le monde. Mais cette quantification économique devrait ou pourrait prendre en compte les coûts cachés engendrés par les pratiques agricoles et en particulier les intrants. Dans un rapport publié en 2023⁴, l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture des Nations Unis (FAO) estime que les coûts cachés engendrés par l'agriculture, en particulier en matière de santé et d'environnement, représenteraient 2,4 fois le chiffre d'affaires de la production primaire. Il serait intéressant, bien sûr en acceptant des approximations fortes, de voir dans quelle mesure les scénarios proposés modifient ou non en profondeur ce ratio.

La seconde voie d'enrichissement serait la déclinaison de ces scénarios pour quelques filières en France. Cette déclinaison a été illustrée au travers de quatre études de cas dans des territoires et a permis de valider à la fois la pertinence de la démarche suivie et la cohérence interne des scénarios. Il serait donc possible de traduire ces scénarios pour une orientation productive donnée, en entrant davantage dans le détail des méthodes de protection des cultures disponibles et dans les indispensables évolutions du système sociotechnique pour que ces nouvelles protections des cultures puissent être développées.

Enfin, la grande inconnue à horizon 2050 est l'étendue des effets du changement climatique. Le travail de prospective qui est présenté dans cet ouvrage avait comme point focal la protection durable des cultures. Le choix a donc été fait de ne pas chercher à entrer dans le détail des effets du changement climatique, ce qui était légitime et pertinent pour parvenir à des scénarios contrastés et un résultat solide que les acteurs professionnels, les organismes de recherche et les décideurs publics puissent mobiliser.

4. FAO, 2023. *La Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2023. Pour une transformation des systèmes agroalimentaires : connaître le coût véritable des aliments*, Rome, FAO, 166 p., DOI :10.4060/cc7724fr

Cette base étant posée, les effets du changement climatique peuvent être évalués en analysant comment la trajectoire climatique moyenne et les fortes variations interannuelles attendues vont ou non mettre en délicatesse les leviers évoqués dans chaque scénario. Il y a une seconde inconnue qui est celle liée aux organismes invasifs nouveaux qui pourront s'installer du fait de conditions climatiques qui leur seraient devenues favorables. Qu'il s'agisse d'adventices inconnues, de nouveaux pathogènes fongiques ou d'insectes jusqu'alors absents, comment les leviers mobilisés dans les trois scénarios, depuis les systèmes de culture, les technologies et agroéquipements ainsi que les structures d'exploitation jusqu'aux chaînes de valeur alimentaire, pourront être actionnés pour répondre très rapidement sans laisser les producteurs face à des situations non anticipées d'absence de protection des cultures ? S'il n'est pas possible d'y répondre dès à présent, le travail de prospective a accumulé un ensemble de ressources qui devraient permettre de traiter cette question.

Pour conclure cette préface, je tenais à remercier tous ceux qui se sont mobilisés pour rendre possible cette prospective, pour la conduire et pour l'alimenter. Que soient ici remerciés l'équipe de la Direction de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études d'INRAE, les pilotes scientifiques du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement » et les coordinateurs des dix projets ainsi que les très nombreux experts nationaux et européens ! Ce travail n'aurait pu voir le jour sans votre investissement et sans ce « lâcher prise » indispensable à toute activité de création et de prospective.

Je vous souhaite à tous un très bon moment de lecture.

Christian HUYGHE
Directeur scientifique Agriculture, INRAE

Prospective : un collectif de travail

Les auteurs de cet ouvrage sont également les membres de l'équipe projet de la prospective : Olivier Mora (coordinateur de la prospective, INRAE DEPE), Jeanne-Alix Berne (INRAE DEPE), Jean-Louis Drouet (INRAE Ecosys/DEPE), Chantal Le Mouël (INRAE SMART/DEPE), Claire Meunier (INRAE DEPE), Agneta Forslund (INRAE Smart), Victor Kieffer (INRAE Smart) et Lise Paresys (INRAE DEPE).

Le comité d'experts européen de la prospective était composé de : Sari Autio (Tukes, Finlande), Paolo Barberi (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Pascal Bergeret (Ciheam, France), Oana Bujor-Nenita (UASVMB, Roumanie), Stefano Carlesi (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Henriette Christensen (PAN Europe, Belgique), Roxana Ciceoi (UASVMB, Roumanie), Jean-Philippe Deguine (Cirad, France), Jérôme Enjalbert (INRAE, France), Gina Fintineru (UASVMB, Roumanie), Laurent Huber (INRAE, France), Philippe Jeanneret (Agroscope, Suisse), Steffen Kolb (Zalf, Allemagne), Claire Lamine (INRAE, France), Guillaume Martin (INRAE, France), Antoine Messéan (INRAE, France), Aline Mosnier (Fable consortium, France), Savine Oustrain (Vivescia, France), Emmanuelle Porcher (MNHN, France), Yann Raineau (INRAE, France), Elin Rööf (SLU, Suède).

Les coordinateurs des cas d'étude régionaux étaient : Sari Autio (Tukes, Finlande), Ana Butcaru (UASVMB, Roumanie), Stefano Carlesi (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Hubert De Rochambeau (INRAE/VitiREV, France), Gina Fintineru (UASVMB, Roumanie), Marja Jalli (Luke, Finlande), Viorica Lagunovschi (UASVMB, Roumanie), Emilia Laitala (Tukes, Finlande), Cécile LeLabousse (IVBD, France), Giovanni Pecchioni (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Yann Raineau (INRAE, France).

Remerciements

L'équipe projet remercie chaleureusement :

- les membres du comité de suivi de la prospective ;
- les scientifiques et parties prenantes impliqués dans les ateliers dédiés des groupes d'experts thématiques, de la transition, de l'analyse quantitative et des études de cas régionales ainsi que les experts interrogés individuellement lors des analyses rétrospectives des composantes et de l'analyse quantitative, dont la liste complète figure en annexe 3 ;
- les scientifiques engagés dans les projets financés par le programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement » qui ont participé à l'identification des besoins de recherche et dont la liste complète figure en annexe 3 ;
- Marc-Antoine Caillaud, Kim Girard et Sandrine Gobet (INRAE, DEPE) pour la gestion administrative du projet ainsi que pour leur appui à l'organisation des ateliers, des réunions et de la conférence de restitution le 21 mars 2023.

Introduction

Mora O., Meunier C., Le Mouël C., Drouet J.-L.

Du fait de leurs effets négatifs sur la biodiversité, sur le fonctionnement des écosystèmes, sur les ressources en eau et sur la santé humaine, l'utilisation de pesticides chimiques est un problème majeur pour la durabilité de l'agriculture et des systèmes alimentaires au niveau mondial (Tang *et al.*, 2021). La diminution rapide de la biomasse des insectes et des populations d'oiseaux dans les zones rurales en Europe est notamment associée à l'utilisation massive de pesticides (Rigal *et al.*, 2023 ; Leenhardt *et al.*, 2023 ; Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019), tandis que des évaluations récentes attestent les liens entre l'exposition aux pesticides et les risques de maladies chez les humains (EEA, 2023 ; HBM4EU, 2022 ; Baldi *et al.*, 2021).

Or les pesticides sont une pierre angulaire des systèmes agricoles. Depuis la Seconde Guerre mondiale, l'utilisation de pesticides chimiques a contribué à une augmentation spectaculaire des rendements, à leur stabilisation dans le temps et à la standardisation de la qualité des produits. Si cette trajectoire de changement a généré des systèmes de culture très productifs, elle a aussi produit des paysages et des systèmes de culture simplifiés qui sont plus sensibles aux ravageurs (Ziesche *et al.*, 2023). En raison de la forte pression de sélection exercée par l'application régulière de pesticides chimiques, on assiste à l'émergence rapide de ravageurs résistants sous l'effet d'un processus évolutif (Ravigné *et al.*, 2021 ; Bakker *et al.*, 2020 ; Aubertot *et al.*, 2005a). En outre, l'utilisation de pesticides réduit les services écosystémiques tels que la pollinisation (Sponsler *et al.*, 2019), la lutte naturelle contre les ravageurs par les insectes (Bonato *et al.*, 2023) et les effets bénéfiques des micro-organismes du sol sur les plantes (Edlinger *et al.*, 2022). Simultanément, en raison de leurs impacts sur la santé et l'environnement, plus de la moitié des substances actives entrant dans la composition des pesticides ont été retirées du marché européen depuis 2000 (Marchand *et al.*, 2022 ; EC, 2018 ; Chauvel *et al.*, 2012). Les agriculteurs sont donc pris dans une « course aux armements » qui pourrait conduire à une impasse à moyen ou long terme : d'une part, ils doivent faire face à l'émergence de ravageurs résistants en utilisant de nouvelles familles de pesticides ; d'autre part, ils sont confrontés à une réduction progressive du nombre de pesticides chimiques disponibles sur le marché (Jacquet et Jouan, 2022a).

Dans le même temps, les impacts des pesticides chimiques sur la santé humaine et l'environnement, notamment la biodiversité, ainsi que sur la qualité de l'eau, de l'air et des sols (Leenhardt *et al.*, 2023), sont devenus une préoccupation majeure pour la société civile, l'opinion publique et les consommateurs. Depuis plusieurs décennies, des politiques nationales et européennes, portant sur la qualité de l'eau et

l'utilisation des pesticides, tentent de réduire l'usage de ces derniers. Toutefois, à ce jour, ces politiques publiques n'ont eu qu'un impact limité sur l'utilisation des pesticides : à l'échelle européenne, le volume de substances actives utilisé est resté stable, à environ 350 000 t/an au cours des vingt dernières années (FAOStat, 2020). Récemment, la stratégie européenne « De la ferme à la table » a fixé un objectif ambitieux de réduction de moitié de l'utilisation et des risques des pesticides chimiques d'ici à 2030 (EC, 2020a). Cet objectif est à l'origine d'un intense débat quant à sa faisabilité, certains considérant qu'il serait dommageable pour la production et la souveraineté alimentaire européennes, d'autres soulignant que l'évaluation de l'impact devrait tenir compte des modifications des pratiques agricoles, des régimes alimentaires et des importations d'aliments pour les animaux. C'est dans ce débat que s'inscrit cet ouvrage.

Est-il possible de défaire ce verrouillage sociotechnique qui s'est construit autour des pesticides (Vanloqueren et Baret, 2009 ; Cowan et Gunby, 1996) et de changer la trajectoire des systèmes agricoles et alimentaires ? Est-il possible, à moyen terme, de se passer de pesticides chimiques en agriculture, tout en assurant une protection des cultures efficace ?

Récemment, plusieurs modèles conceptuels normatifs (Pergner et Lippert, 2023 ; Jacquet *et al.*, 2022 ; Zimmermann *et al.*, 2021) et des systèmes expérimentaux (Colnenne-David *et al.*, 2023 ; Koch *et al.*, 2023 ; Saile *et al.*, 2023) d'agriculture sans pesticides ont été proposés dans la littérature scientifique. Les systèmes de culture sans pesticides sont conçus pour atteindre des objectifs environnementaux et des rendements plus élevés qu'en agriculture biologique (AB) du fait de l'utilisation d'engrais synthétiques (Colnenne-David *et al.*, 2023). Dans la littérature existante, certains systèmes sont basés sur des principes agroécologiques (Ewert *et al.*, 2023 ; Jacquet *et al.*, 2022), d'autres sur l'extensification des systèmes de culture (Möhring et Finger, 2022) ou sur un mélange de pratiques agroécologiques et de technologies d'agriculture de précision (Zimmermann *et al.*, 2021).

L'étude prospective présentée dans cet ouvrage étudie la possibilité d'une protection des cultures efficace et d'une agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050, ainsi que les modalités d'une transition vers ce type de système, et évalue les impacts européens d'une telle transformation. Quelles pourraient être les formes spécifiques d'une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 ? À quelles conditions une telle transition serait-elle possible ? Quels en seraient les impacts à l'échelle européenne sur la production, l'utilisation des terres, la balance commerciale et les émissions de gaz à effet de serre (GES) ?

Deux grands principes ont guidé ce travail. Premièrement, l'idée que les impacts limités des politiques publiques européennes et nationales passées qui se sont focalisées sur la réduction de l'utilisation des pesticides justifie un changement de paradigme dans l'approche de la question (Hossard *et al.*, 2017 ; Buckwell *et al.*, 2020). Il s'agit désormais de basculer d'une approche incrémentale visant à réduire l'usage

des pesticides, qui est le paradigme actuel des politiques publiques en Europe, à une approche disruptive visant à construire des systèmes de culture sans pesticides chimiques. Ce changement de paradigme est un enjeu crucial pour la recherche, afin d'anticiper les systèmes agricoles de demain (Jacquet *et al.*, 2022). Deuxièmement, l'idée que les systèmes de culture sont étroitement imbriqués dans les systèmes alimentaires (et qu'ils en sont dépendants) justifie d'intégrer pleinement les systèmes alimentaires dans la réflexion prospective lorsqu'il s'agit d'envisager la construction d'une agriculture sans pesticides chimiques. En effet, les transformations des systèmes alimentaires orientent pour une large part les évolutions des systèmes agricoles.

Dans cette prospective, l'objectif à atteindre a été fixé dès le départ, il s'agit de parvenir à une agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050. À ce titre, l'étude des futurs possibles répond à une approche normative, au sens où l'objectif que l'on cherche à atteindre à l'horizon 2050 est fixé à l'avance (à l'inverse d'une prospective exploratoire, où l'on aurait cherché à explorer le champ des futurs possibles de l'agriculture en général). Ainsi, tous les scénarios élaborés sont en rupture par rapport à la plupart des tendances en cours. Pour autant, l'objectif de cette prospective est d'identifier la diversité des scénarios et des trajectoires qui pourraient permettre d'atteindre cet objectif. Cette caractéristique différencie ce travail de prospective de la plupart des études prospectives tournées vers la transition qui sont fréquemment fondées sur un seul scénario. À l'inverse de la construction d'une prospective où un scénario prescriptif s'imposerait aux acteurs dans le cadre d'une transition, la prospective « Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 » vise à définir le champ des possibles conduisant à une agriculture sans pesticides chimiques en 2050 en Europe, et à évaluer les différents impacts de ces scénarios. Cette étude prospective a ainsi pour ambition de poser un débat sur les futurs possibles pour atteindre à long terme une agriculture sans pesticides en Europe et d'examiner les différentes options envisageables. Ainsi, dans cette prospective, l'objectif normatif de long terme se traduit dans une pluralité de futurs possibles en 2050.

La suppression des pesticides chimiques n'est pas une tâche facile pour l'agriculture, car les pesticides chimiques sont un élément clé de l'agriculture conventionnelle. Le retrait des pesticides chimiques de l'agriculture est un problème « embrouillé » (*wicked problem* en anglais ; Rittel et Webber, 1973), ce qui signifie qu'il n'existe pas de solution simple à ce problème du fait de sa nature complexe et des interdépendances. Réfléchir à une agriculture sans pesticides chimiques nécessite de repenser l'agriculture et de prendre en compte les multiples interactions dans lesquelles elle s'inscrit : interactions avec les entités et les ressources naturelles, imbrication dans la dynamique des écosystèmes, insertion de l'agriculture dans le système alimentaire, et interactions avec les politiques publiques, les acteurs territoriaux, le commerce et les consommateurs.

La méthode prospective présentée ici a été conçue, premièrement, pour intégrer la complexité du système agricole et alimentaire européen et imaginer les différents

enchevêtrements futurs qui pourraient donner naissance à une agriculture sans pesticides en Europe ; deuxièmement, pour évaluer les impacts de ces scénarios de manière quantitative ; et troisièmement, pour identifier les trajectoires de transition possibles qui pourraient conduire à de tels scénarios en 2050.

Différentes composantes ont été analysées afin d’imaginer des agricultures européennes sans pesticides en 2050 (figure I.1) : les systèmes de culture intégrant une protection des cultures sans pesticides chimiques ; les structures d’exploitation ; les systèmes de connaissance et d’innovation agricoles ; l’amont agricole en particulier les agroéquipements et technologies numériques ; les chaînes de valeur alimentaires ; la consommation et les régimes alimentaires ; les politiques publiques et le commerce international. Le changement climatique a également été pris en compte de manière générale, notamment au travers de son impact sur les interactions entre plantes cultivées et bioagresseurs.

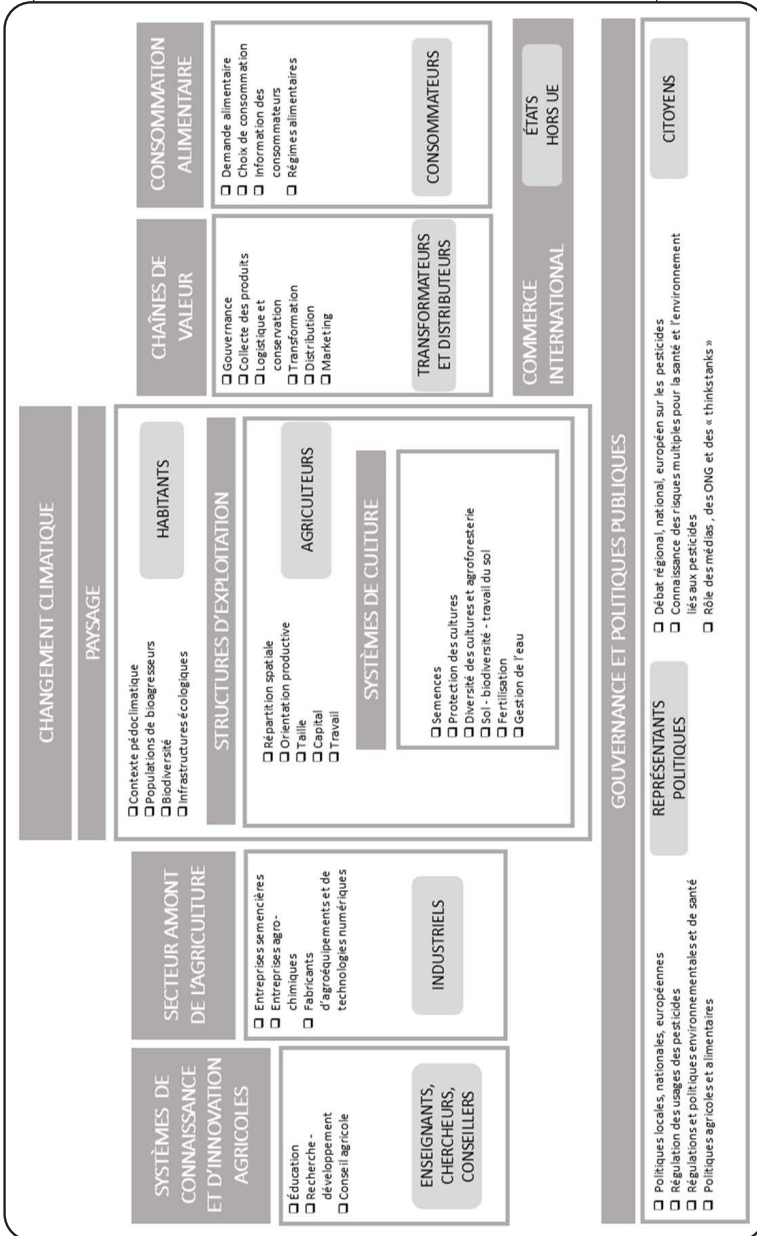
La méthode employée pour cette prospective (annexe 1) est une approche originale combinant une méthode de construction de scénarios fondée sur une analyse morphologique⁵, une approche par modélisation basée sur la version AE2050 de l’outil GlobAgri (annexe 2), et une approche de construction de trajectoires de transition (dite de *backcasting*⁶) aux échelles européenne et régionale. La méthode est détaillée en annexe 1 de l’ouvrage. Au total, cent quarante-quatre experts européens, scientifiques et parties prenantes (organisations non gouvernementales, conseil agricole, coopératives, agriculteurs, associations professionnelles, entreprises agroalimentaires et d’agroéquipement, collectivités territoriales), ont été associés aux différentes phases du processus au sein de huit groupes d’experts (décrits dans l’annexe 3).

La construction des scénarios repose sur une analyse des dynamiques passées (dite analyse rétrospective) de chaque composante du système, dégagant les grandes tendances, les signaux faibles et les ruptures possibles au moyen de revues de la littérature, d’entretiens et de l’expertise de groupes d’experts (chapitres 1, 2 et 3). Sur la base de ces analyses, l’équipe projet a élaboré avec les groupes d’experts des micro-scénarios contrastés décrivant les changements possibles des composantes du système à l’horizon 2050 (collectées dans le tableau morphologique 4.1 présenté dans le chapitre 4, section 1) et les a combinées pour construire des scénarios européens. Ensuite, des simulations basées sur le modèle GlobAgri-AE2050 ont évalué les impacts de chaque scénario (chapitre 5). Enfin, les scénarios ont été soumis à une analyse rétroprojective pour élaborer des trajectoires ou chemins de transition permettant

5. L’analyse morphologique est « une méthode de structuration et d’investigation de l’ensemble des relations contenues dans des problèmes multidimensionnels et non quantifiables » (Ritchey, 2011). Appliquée dans le domaine de la prospective, l’analyse morphologique permet à l’aide d’une matrice (appelé tableau morphologique) de « considérer l’ensemble des évolutions possibles et de construire des scénarios » en explorant les combinaisons plausibles d’hypothèses d’évolution (Durance et Godet, 2010 ; voir aussi Amer *et al.*, 2013).

6. La démarche de *backcasting*, dite aussi rétroprojective, consiste à travailler à rebours à partir d’un futur souhaitable afin de déterminer les conditions possibles de réalisation de ce futur et notamment les actions et les politiques publiques nécessaires pour y parvenir (Robinson, 1982).

Figure I.1. Les différentes composantes du système étudié



d'atteindre une agriculture sans pesticides chimiques à l'horizon 2050 au niveau européen ainsi que dans quatre régions européennes (chapitre 4, section 1 ; chapitre 6).

La prospective a ainsi produit trois scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050 et leur trajectoire de transition, quatre cas d'étude dans des filières et des régions européennes, ainsi que l'évaluation quantitative des impacts des scénarios sur la production, l'utilisation des terres, le commerce international et les émissions de gaz à effet de serre en Europe et au niveau mondial. Cet ouvrage présente les principaux résultats de cette étude. Il est issu du rapport complet de la prospective, disponible en anglais (Mora *et al.*, 2023)⁷.

L'ouvrage est structuré de la manière suivante. Le chapitre 1 présente les grands enjeux de la sortie des pesticides chimiques en agriculture. Les chapitres 2 et 3 traitent des composantes du système de prospective et fournissent pour chacune d'entre elles une analyse rétrospective et des microscénarios alternatifs d'évolution en 2050. Tandis que le chapitre 2 se concentre sur les stratégies de protection des cultures et les systèmes de culture sans pesticides chimiques, le chapitre 3 aborde d'autres composantes du système comme les structures agricoles et les chaînes de valeur. Le chapitre 4 présente les trois scénarios de l'agriculture européenne sans pesticides en 2050, ainsi que les trajectoires de transition. Le chapitre 5 détaille les impacts quantitatifs des scénarios sur la production et le commerce agricoles européens, l'utilisation des terres et les émissions de gaz à effet de serre. Le chapitre 6 présente les études de cas réalisées dans quatre régions et filières européennes (en Finlande, France, Italie et Roumanie). Enfin, le chapitre 7 présente les principaux enseignements que nous avons tirés de cette prospective.

7. En accès libre en ligne.

1. L'enjeu du retrait des pesticides chimiques des systèmes agricoles et alimentaires

Depuis les années 1950, les pesticides chimiques sont devenus un outil de gestion majeur dans les systèmes de culture européens. Ils ont considérablement transformé la protection des cultures ainsi que les systèmes de culture, et ont permis une augmentation importante de la production agricole, tout en assurant une qualité élevée des produits. Depuis les années 1990, les effets négatifs des pesticides sur la santé humaine et l'environnement ont conduit à repenser les stratégies de protection des cultures, afin de limiter leur utilisation et leurs impacts, avec des résultats limités en matière de réduction des usages des pesticides chimiques.

Ce chapitre présente un état des lieux des impacts des pesticides et une analyse rétrospective de l'évolution passée de la protection des cultures. La première section est une synthèse de l'état actuel des connaissances concernant les effets des pesticides sur la santé humaine et l'environnement, sur la base des dernières expertises scientifiques. La deuxième section introduit les concepts de la protection des cultures tandis que la troisième section présente une analyse rétrospective de l'évolution passée des systèmes de culture et de la protection des cultures.

1. Les impacts négatifs des pesticides chimiques sur l'environnement et la santé humaine

Meunier C., Mora O.

■ La contamination par les pesticides de tous les types d'environnement

Les pesticides peuvent contaminer l'environnement à trois étapes de leur cycle de vie : lors de leur production (par des fuites éventuelles ou des accidents industriels), lors de leur utilisation (en agriculture, dans les jardins publics ou par les particuliers), et lors de leur élimination (principalement par incinération). La cause principale de contamination des milieux par les pesticides est leur utilisation, notamment pour la protection des cultures. Les données existantes indiquent que les pesticides sont présents dans tous les environnements (figure 1.1), terrestres, aquatiques marins et continentaux, atmosphériques et biotiques.

Figure 1.1. Schéma général de la contamination de l'environnement par les pesticides



Source : Leenhardt *et al.*, 2023.

La surveillance de la contamination l'environnement par les pesticides a été progressive-ment mise en place en Europe depuis les années 2000, principalement sur l'eau. En 2020, sur la base des données nationales communiquées à l'Agence européenne de l'environnement (EEA), un ou plusieurs pesticides ont été détectés au-dessus des seuils d'effet ou de qualité dans 22 % des sites de surveillance des eaux de surface en Europe, y compris les rivières et les lacs (EEA, 2023). On y retrouve principalement des substances qui ne sont plus autorisées en Europe, indiquant leur persistance dans l'environnement.

Dans les sols, et même s'il n'existe pas encore d'indicateur réglementé de qualité des sols en lien avec les pesticides, une étude basée sur les données de l'enquête Teruti-Lucas 2015 dans onze pays européens et six systèmes de culture différents a révélé que 83 % des échantillons prélevés contenaient un ou plusieurs résidus de pesticides et que 58 % contenaient des mélanges de deux ou trois pesticides (Silva *et al.*, 2019).

En l'absence d'une réglementation européenne spécifique sur la surveillance de la contamination de l'air ambiant par les pesticides, les données atmosphériques sont plus limitées et hétérogènes à travers l'Europe. Néanmoins, en France par exemple, la présence de pesticides organiques dans l'atmosphère est démontrée, tant dans les zones rurales que dans les zones urbaines, bien qu'à des concentrations variables (Leenhardt *et al.*, 2023).

Enfin, de nombreuses études documentent la contamination de l'ensemble du biote par les pesticides, des communautés microbiennes aux prédateurs. Des résidus de

pesticides sont retrouvés par exemple chez les abeilles (Murcia-Morales *et al.*, 2021), les oiseaux, les poissons et les petits mammifères (EEA, 2023 ; Corcellas *et al.*, 2015 ; Lennon *et al.*, 2020 ; Fritsch *et al.*, 2022). Résidus de pesticides et communautés microbiennes interagissent dans les sols. Au-delà des communautés microbiennes du sol, les pesticides pourraient également, selon certains auteurs, impacter les microbiomes des plantes et d'autres organismes vivants (Sim *et al.*, 2022).

■ Les effets des pesticides sur la biodiversité de mieux en mieux connus

Les pesticides sont intrinsèquement nocifs pour les organismes vivants. Lors de leur application, et même si elle est destinée à cibler spécifiquement un bioagresseur, ils peuvent impacter d'autres organismes vivants, affecter les processus écologiques et rendre les écosystèmes moins diversifiés et moins résistants aux perturbations (EEA, 2023). Par ailleurs, les pesticides sont devenus de plus en plus efficaces, ce qui signifie qu'ils peuvent avoir des effets négatifs sur les écosystèmes même s'ils sont appliqués à plus faible dose (Schulz *et al.*, 2021).

L'expertise scientifique collective INRAE-Ifremer concernant les impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques conclut que « les connaissances acquises renforcent le lien de causalité entre l'utilisation de pesticides et le déclin constaté depuis plusieurs décennies des populations d'invertébrés et d'oiseaux, notamment dans les espaces agricoles. Les pesticides sont également fortement suspectés de contribuer au large déclin des populations de chauves-souris et d'amphibiens. Les conséquences des effets observés pour les autres groupes biologiques (micro-organismes, végétaux, vertébrés autres que ceux détaillés dans cette partie) sont moins clairement mises en évidence dans la littérature scientifique » (Leenhardt *et al.*, 2023). Ainsi par exemple, Hallmann *et al.* (2017) ont estimé à 76 % (et jusqu'à 82 % au milieu de l'été) la baisse de la biomasse moyenne d'insectes aériens entre 1989 et 2016 dans un échantillon de zones naturelles protégées en Allemagne. Les causes identifiées du déclin observé par les auteurs sont l'intensification de l'agriculture incluant l'utilisation de pesticides, le travail du sol, l'utilisation d'engrais et d'autres mesures agronomiques, ainsi que d'autres facteurs tels que le changement climatique (Hallmann *et al.*, 2017).

Les effets des pesticides sur les organismes peuvent être directs, en altérant l'état physiologique et le comportement des individus, ainsi qu'en réduisant le nombre et en perturbant la dynamique des populations. Ils peuvent également être indirects, principalement en diminuant la disponibilité alimentaire et l'habitat, et en modifiant les interactions biotiques. Ils sont observés pour des substances désormais interdites, comme les insecticides néonicotinoïdes, mais également pour des substances approuvées. Les effets cocktails de mélanges de substances actives de pesticides sont également de plus en plus documentés, effets qui peuvent être cumulatifs, voire synergiques (Rizzati *et al.*, 2016 ; Tosi *et al.*, 2022 ; Gandar *et al.*, 2017 ; Laetz *et al.*, 2009).

I Des fortes présomptions de lien entre exposition aux pesticides et santé humaine

Les êtres humains sont exposés aux pesticides par les voies cutanée, respiratoire et orale (ingestion de boissons et d'aliments). Les pesticides peuvent également atteindre le fœtus, ce qui entraîne une exposition in utero pendant la grossesse.

L'exposition humaine aux pesticides concerne essentiellement les utilisateurs agricoles de pesticides, principalement les agriculteurs et les ouvriers agricoles, mais aussi les travailleurs de l'industrie dans les installations de fabrication ou de stockage des pesticides (exposition professionnelle). L'Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a estimé qu'en 2010, en France, plus d'un million de professionnels du secteur agricole étaient potentiellement exposés aux pesticides (Laurent *et al.*, 2016). En France, plusieurs maladies professionnelles sont officiellement reconnues comme directement liées à l'exposition aux pesticides⁸. L'exposition aux pesticides touche également la population générale, au travers de la contamination de l'environnement à proximité des zones traitées, par la consommation d'aliments et de boissons et leurs résidus de pesticides, ainsi que par les usages domestiques tels que les jardins privés (bien que l'utilisation de pesticides par les particuliers ait été interdite dans certains pays européens).

Depuis les années 1980, des données épidémiologiques se sont accumulées concernant l'association entre l'exposition aux pesticides et plusieurs effets sur la santé. L'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) a réalisé en 2013 – et actualisé en 2021 – une expertise collective sur l'effet des pesticides sur la santé humaine (Baldi *et al.*, 2021). Pour le rapport daté de 2021, le groupe d'experts a compilé plus de 5 300 documents afin d'identifier le niveau de preuve des liens entre l'exposition aux pesticides et la santé humaine.

Chez l'adulte, le rapport conclut à la présomption forte d'un lien entre l'exposition aux pesticides en milieu professionnel et six maladies : lymphomes non hodgkiniens (LNH), myélome multiple, cancer de la prostate, maladie de Parkinson, troubles cognitifs, bronchopneumopathie chronique obstructive et bronchite chronique. Des liens sont identifiés pour d'autres pathologies ou évènements de santé avec une présomption moyenne (maladie d'Alzheimer, troubles anxiodépressifs, etc. ; tableau 1.1).

Chez l'enfant, il est identifié une présomption forte de lien entre l'exposition aux pesticides de la mère pendant la grossesse (exposition professionnelle ou par utilisation domestique) ou chez l'enfant et le risque de certains cancers, en particulier les leucémies et les tumeurs du système nerveux central.

Des études suggèrent un lien entre l'exposition des riverains des terres agricoles et la maladie de Parkinson, et également entre la proximité résidentielle à des zones

8. Dans le tableau des maladies professionnelles liées à l'activité agricole, la maladie de Parkinson et le cancer de la prostate sont reconnus explicitement comme des maladies « provoqué[es] par les pesticides » (<https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp.html> ; Régime agricole, tableaux 58 et 61).

d'épandages de pesticides (rayon inférieur à 1,5 km) et le comportement évocateur des troubles du spectre autistique chez l'enfant, mais avec un niveau de présomption faible.

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 par l'expertise Inserm

Pathologies	Populations concernées par un excès de risque lié à l'exposition aux pesticides	Présomption d'un lien
Altération des capacités motrices et cognitives chez l'enfant	Population générale – exposition pendant la grossesse (usages domestiques, proximité résidentielle)	+
	Professionnels – exposition pendant la grossesse	±
Comportement évocateur des troubles du spectre autistique chez l'enfant	Population générale (usages domestiques, proximité résidentielle)	±
Troubles cognitifs	Agriculteurs, avec ou sans antécédents d'intoxications aiguës	++
	Populations générales ou riverains des zones agricoles	+
Troubles anxio-dépressifs	Agriculteurs ou applicateurs de pesticides	+
Maladie d'Alzheimer	Agriculteurs	+
Maladie de Parkinson	Professionnels	++
	Population générale ou riverains des zones traitées	±
Sclérose latérale amyotrophique	Agriculteurs	±
Leucémies de l'enfant (LAL et LAM)	Professionnels	+ à ++
	Population générale (usages domestiques)	++
Tumeurs du système nerveux central de l'enfant	Professionnels	++
	Population générale (usages domestiques)	++
Tumeurs du système nerveux central de l'adulte (gliomes et méningiomes)	Populations agricoles	+
Lymphomes non hodgkiniens	Agriculteurs, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	++
Myélome multiple	Agriculteurs, applicateurs de pesticides	++
	Éleveurs	+
Lymphome de Hodgkin	Professionnels du secteur agricole	±
Leucémies	Agriculteurs, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	+
Cancer de la prostate	Agriculteurs, applicateurs de pesticides, ouvriers en industrie de production	++
Cancer du sein	Professionnels	±

Pathologies	Populations concernées par un excès de risque lié à l'exposition aux pesticides	Présomption d'un lien
Cancer de la vessie	Professionnels Population générale	+ ±
Cancers du rein	Professionnels	+
Sarcomes des tissus mous et des viscères	Travailleurs agricoles, travailleurs du bois, jardiniers, éleveurs	+
Altérations de la santé respiratoire : fonction respiratoire, asthme, sifflements, bronchopneumopathie chronique obstructive, bronchite chronique	Professionnels	+ à ++
Pathologies thyroïdiennes	Professionnels	+
Endométriose	Population générale	±

Présomption forte : ++ ; présomption moyenne : + ; présomption faible : ±.
LAL : leucémies aiguës lymphoïdes ; LAM : leucémies aiguës myéloïdes.
Source : Baldi *et al.*, 2021.

I L'estimation des coûts des pesticides pour la société

La gestion des conséquences des effets des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement représente un coût pour la société. Il s'agit par exemple de la prise en charge des patients atteints de maladies liées à leur exposition aux pesticides, de la dépollution des milieux, des aides financières pour réduire les utilisations de pesticides.

Plusieurs études ont récemment tenté d'estimer ces coûts, sur la base des données disponibles, malgré les difficultés d'accès aux données ou d'attribution des facteurs de contribution des pesticides à certains coûts, par exemple les dépenses publiques de préservation de la biodiversité ou de traitement des cancers.

Dans les pays européens, les coûts estimés vont de 195,56 millions de dollars des États-Unis (USD) en 1996 en Allemagne, à 383,55 millions USD en 1996 au Royaume-Uni (Bourguet et Guillemaud, 2016). Une étude récemment menée en France (Alliot *et al.*, 2022) sur les coûts sociaux de l'utilisation des pesticides les a estimés à 372 millions d'euros en 2017, ce qui représente plus de 10 % du budget du ministère de l'Agriculture. Les connaissances concernant la contamination des pesticides dans divers environnements ainsi que leurs impacts sur l'environnement, les écosystèmes et la santé humaine se sont considérablement améliorées depuis les années 2000, grâce à la multiplication des études scientifiques et des expertises collectives. La recherche sur les pesticides continue de se développer, pour mieux comprendre par exemple les effets cocktail de ces substances, ou pour étudier le lien entre l'exposition aux pesticides et

les maladies par la réalisation d'études de cohorte auprès des riverains. La production des connaissances intéresse également les citoyens, de plus en plus préoccupés par l'impact des pesticides sur la santé. Certains se mobilisent dans leur territoire, à l'échelle nationale et européenne, pour sensibiliser les populations et les pouvoirs publics à ces questions. Ces connaissances accrues conduisent les pouvoirs publics à élaborer des politiques visant à réduire l'utilisation et l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé.

À l'avenir, on peut anticiper que le développement des connaissances concernant les impacts des pesticides sur la santé et les écosystèmes est susceptible d'entraîner de nouvelles interdictions de ces substances, limitant les possibilités pour les agriculteurs de protéger leurs cultures par ce moyen, et les incitant à changer de pratiques.

2. Les bioagresseurs et la protection des cultures

Berne J.-A., Mora O.

La protection des cultures désigne les stratégies mises en œuvre pour empêcher ou réduire les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs. Afin de mieux comprendre les enjeux de la protection des cultures, nous définirons tout d'abord ce que sont les bioagresseurs et leurs impacts, puis présenterons les stratégies de gestion des bioagresseurs actuellement majoritairement mobilisées, basées sur l'usage de pesticides chimiques.

■ Qu'est-ce qu'un bioagresseur ?

Traditionnellement, les bioagresseurs sont définis par rapport aux dommages causés aux plantes cultivées. D'après la FAO, un bioagresseur est un « organisme vivant qui cause des dommages aux plantes cultivées ou aux récoltes » (FranceTerme, 2018). L'évaluation des dommages causés aux plantes cultivées ou aux récoltes est donc essentielle au fait de considérer, ou non, une entité vivante comme un bioagresseur. L'équivalent en anglais du terme *bioagresseur* est le terme *pest*.

Les dégâts causés par les bioagresseurs aux plantes cultivées peuvent se caractériser par une altération de la croissance ou de la vigueur de la plante, de sa morphologie ou de celle de ses organes (par exemple : lésions, modification de couleur, déformations, nécroses, galls), ou encore de leur composition chimique (teneur en nutriments, présence de toxines, etc.) (Tibi *et al.*, 2023). Le terme *bioagresseur* est équivalent à la notion d'*ennemi des cultures* (FranceTerme, 2018). Certains textes législatifs internationaux comme les directives européennes et la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) utilisent le terme d'*organisme nuisible*, qui désigne « toute espèce, souche ou biotype de végétal, d'animal ou d'agent pathogène nuisible pour les végétaux ou produits végétaux ».

Le terme *bioagresseurs* recouvre différentes catégories d'organismes susceptibles de causer des dégâts sur les plantes cultivées : (i) les micro-organismes pathogènes (champignons, bactéries, virus, etc.) à l'origine de maladies des plantes cultivées ; (ii) les ravageurs des cultures qui comprennent les arthropodes phytophages (insectes, acariens) et d'autres ravageurs tels que les nématodes, gastéropodes, oiseaux, mammifères (rongeurs, taupes, etc.) ; et (iii) les plantes adventices (plantes spontanées et repousses de cultures) (Aubertot *et al.*, 2005b ; Tibi *et al.*, 2023). Certains agents pathogènes sont transmis aux plantes par l'intermédiaire d'organismes vecteurs (insectes le plus souvent, mais aussi acariens, nématodes, mammifères, etc.) que l'on assimile alors à des bioagresseurs (*ibid.*).

Ainsi, le terme *bioagresseur* traduit des réalités très hétérogènes, et recouvre une grande diversité d'organismes vivants aux caractéristiques très contrastées. Le cycle de vie d'un bioagresseur varie d'un bioagresseur à l'autre (Aubertot *et al.*, 2005b).

D'un point de vue conceptuel, ce terme implique une manière particulière de considérer la relation de la plante cultivée avec son milieu. La définition du *bioagresseur* revient à envisager un organisme du point de vue des dommages potentiels qu'il pourrait causer aux plantes cultivées. Le terme *bioagresseur* trace une distinction dans l'environnement de la plante cultivée entre les entités vivantes qui lui sont néfastes et celles qui ne le sont pas, voire qui lui sont utiles.

Cependant, un même organisme peut être envisagé dans certains cas comme un bioagresseur, quand il est susceptible de causer des dommages aux cultures ; et dans d'autres cas comme un organisme bénéfique aux cultures. C'est notamment le cas pour la communauté des adventices (Boinet *et al.*, 2022). Les plantes adventices sont généralement catégorisées en tant que bioagresseurs, car elles entrent en compétition avec les plantes cultivées. Cependant, la biodiversité d'adventices favorise la pollinisation des plantes cultivées (Bretagnolle et Gaba, 2015). Ainsi, certaines peuvent être considérées comme fournissant un ou des services aux cultures. Le terme *bioagresseur* désigne un rôle assigné à certaines entités biologiques dans leur relation à une plante cultivée. Cette notion peut être remise en question. C'est par exemple le cas dans la conceptualisation des maladies des plantes, où l'on envisage la maladie comme un processus lié à la santé de la plante, et non plus comme résultant d'une stricte interaction hôte-pathogène (Méthot et Alizon, 2014).

■ L'impact des bioagresseurs sur les cultures : l'évaluation des dégâts, des dommages et des pertes liés à la présence des bioagresseurs

L'impact des bioagresseurs sur les plantes cultivées est évalué à travers une chaîne de causalité qui relie la présence et l'abondance de bioagresseurs à l'occurrence des dégâts, au niveau de dommages et *in fine* au niveau des pertes économiques associées (Aubertot *et al.*, 2005b). L'estimation des impacts implique une surveillance des

risques liés aux bioagresseurs en général, certains bioagresseurs spécifiques étant surveillés à l'échelle internationale.

Les bioagresseurs provoquent des dégâts sur les plantes cultivées de différentes manières, sur différents organes et à différents stades de développement. Les agents pathogènes et les ravageurs des cultures peuvent provoquer des altérations métaboliques ou mécaniques tandis que les adventices sont en compétition pour les ressources (Tibi *et al.*, 2023). Cependant, la présence d'un bioagresseur dans une parcelle n'est pas systématiquement liée à une perte économique pour l'agriculteur. Un bioagresseur peut induire des dégâts ou des dommages sans avoir pour autant d'effet sur les pertes économiques (tableau 1.2).

Un dégât est défini comme « une altération visible ou mesurable par rapport à une plante saine (symptôme) causée par la présence d'un bio-agresseur sur une culture (déformations, nécroses, piqûres, défauts visuels sur les fruits...) » (Laget *et al.*, 2015). La relation entre abondance des bioagresseurs et occurrence des dégâts n'est pas proportionnelle, et il existe notamment des effets de seuil pour certains bioagresseurs (Tibi *et al.*, 2023).

Les dégâts peuvent entraîner des dommages de récolte, c'est-à-dire la « réduction du rendement en quantité et/ou qualité. Ce terme [de dommage] est synonyme de perte de rendement commercialisable et/ou de perte de rendement en produits transformés » (Laget *et al.*, 2015). La relation entre dégâts et dommages n'est généralement pas proportionnelle, elle dépend de l'élaboration du rendement de la culture et de la relation entre les dégâts et les dommages, propre à chaque couple plante-bioagresseur. Ainsi, tout dégât n'entraîne pas nécessairement des dommages (par exemple lorsque les dégâts ne concernent pas un organe récolté). De plus, le rendement et la qualité des récoltes sont des variables composites qui résultent d'un ensemble de facteurs en interaction parmi lesquels la satisfaction des besoins nutritifs et hydriques de la culture, rendant difficiles l'identification et la quantification des seules pertes de rendement dues aux bioagresseurs (Tibi *et al.*, 2023).

Enfin, les dommages peuvent entraîner une perte économique, c'est-à-dire « la diminution de la valeur marchande de la récolte (et donc du chiffre d'affaires par hectare) occasionnée par les dommages (baisse de rendement et/ou déficit de qualité de la production) dus à l'attaque des bio-agresseurs » (Laget *et al.*, 2005). Le lien entre les dommages et les pertes économiques dépend du contexte socioéconomique. Par exemple, en agriculture biologique, certains défauts de qualité, liés à la présence d'un bioagresseur, n'entraînent pas forcément de pertes économiques car ils sont tolérés à la vente, ce qui n'est généralement pas le cas en agriculture conventionnelle où dans des conditions similaires les produits sont fortement dévalorisés (*ibid.*). Il est donc possible de limiter la perte économique en tolérant des dégâts et des dommages.

Le tableau 1.2 présente les différents types de dégâts et dommages provoqués par les différents types de bioagresseurs.

Tableau 1.2. Dégâts et dommages liés aux différents types de bioagresseurs

Type de bioagresseurs	Dégâts (symptômes observables)	Dommages potentiels (perte de récolte)
Agents pathogènes et organismes ravageurs	Altérations métaboliques ou mécaniques induisant : <ul style="list-style-type: none"> • une entrave à l'enracinement de la plante, à sa germination et au premier stade de sa croissance ; • une interruption partielle ou totale de l'absorption ou de la translocation de l'eau et des nutriments ; • un endommagement des parties vitales de la plante (organes de stockage, surfaces photosynthétiques, organes reproducteurs, structures de soutien). → Altération de la croissance ou vigueur de la plante cultivée, de la morphologie (lésions, modifications de couleur, déformations, nécroses, galles, etc.), de la composition chimique (teneurs en protéines, en sucres, présence de toxines, etc.) des organes	Défaut de croissance de la plante cultivée ou détérioration des organes les rendant plus difficiles à récolter → Perte de rendement Déclassement des produits de récolte du fait des critères organoleptiques ou sanitaires non respectés → Perte qualitative
Plantes adventices (repousses et plantes spontanées)	Compétition avec les plantes cultivées pour les ressources (rayonnement, eau, nutriments) → Altération de la croissance de la plante cultivée	Défaut de croissance de la plante cultivée → Perte de rendement Contamination de la récolte liée à la présence de graines d'adventices récoltées en même temps que la plante cultivée → Perte qualitative
Plantes parasites (qui vivent au détriment d'une autre plante hôte)	Détournement partiel ou total de l'eau ou des nutriments absorbés par la plante cultivée → Altération de la croissance ou vigueur de la plante cultivée	Défaut de croissance de la plante cultivée → Perte de rendement

Source : adapté de Tibi *et al.*, 2023.

Les pertes économiques provoquées par les bioagresseurs peuvent être importantes. Des attaques massives de bioagresseurs ont marqué l'histoire de l'agriculture européenne en entraînant d'importantes pertes de récoltes. Par exemple, entre 1845 et 1848, l'introduction en Irlande du champignon *Phytophthora infestans* (mildiou de la pomme de terre) a détruit les cultures de pommes de terre en Europe, provoquant une importante famine (Jacquet et Jouan, 2022a ; Russel, 2005). De même, à la fin du XIX^e siècle, le phylloxéra de la vigne, puceron importé des États-Unis, a entraîné la destruction en quelques années d'une très grande partie du vignoble français (Jacquet et Jouan, 2022a).

Face à ces risques économiques importants, certains bioagresseurs font l'objet d'une surveillance et d'une réglementation particulière au sein de la CIPV, et sont exposés à une lutte officielle. Il s'agit des « organismes nuisibles réglementés » divisés en « organismes de quarantaine » (qui ne sont pas encore présents ou disséminés dans la zone menacée, présentent un enjeu économique important et font l'objet d'une

lutte officielle) et en « organismes réglementés non de quarantaine » (qui sont déjà présents avec une incidence économique inacceptable).

■ La gestion de l'impact des bioagresseurs : la protection des cultures

Afin de diminuer les impacts des bioagresseurs sur les cultures et les pertes économiques, les agriculteurs ont développé différentes stratégies que l'on regroupe sous le terme de protection des cultures.

La protection des cultures désigne les stratégies mises en œuvre pour empêcher ou réduire les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs. Ces stratégies se divisent en deux grandes familles : les stratégies curatives – ou de lutte – et les stratégies préventives – ou de prophylaxie. Les stratégies curatives visent à diminuer la population des bioagresseurs lorsqu'ils sont déjà présents dans la parcelle, tandis que les stratégies préventives visent à « contrôler préventivement la population de bio-agresseurs [en empêchant son développement] ou à réduire la sensibilité des cultures aux attaques de bioagresseurs » (Aubertot *et al.*, 2005b).

Il existe trois grands types de pesticides correspondant aux différentes catégories de bioagresseurs : les fongicides qui ciblent les champignons pathogènes, les insecticides qui ciblent les insectes ravageurs, et les herbicides qui ciblent les adventives (Jacquet et Jouan, 2022a). Il existe aussi d'autres pesticides : les bactéricides, les acaricides, les molluscicides, les rodenticides ou les nématicides (*ibid.*).

Actuellement, la stratégie de protection des cultures la plus fréquemment mise en œuvre est le contrôle des populations de bioagresseurs au moyen de la lutte chimique, c'est-à-dire en ayant recours à des pesticides chimiques. Mais la stratégie de la lutte chimique a des impacts négatifs sur l'environnement et la santé (chapitre 1, section 1).

Dans le cadre des stratégies de lutte, la protection des cultures s'appuie sur une surveillance des bioagresseurs et des risques liés à leur présence qui déclenche la mise en place d'actions curatives pour protéger les cultures (Naranjo, 2001). La présence des bioagresseurs est observée nationalement et régionalement afin d'aider les agriculteurs à déterminer le moment où il est nécessaire d'intervenir pour limiter les risques et protéger les récoltes (Barzman *et al.*, 2015).

Plusieurs réseaux d'épidémiologie existent en Europe : le réseau international Euroblight et différents réseaux d'épidémiologie nationales ou régionales liés à des plates-formes, des outils d'aide à la décision ou des bulletins hebdomadaires (*ibid.*). En France, 1 500 parcelles agricoles font partie d'un réseau d'observation. Des observateurs mesurent le niveau de présence d'un ensemble de bioagresseurs prédéfini à l'avance, leur stade phénologique, leur présence et les dégâts qu'ils causent. Ces observations peuvent être complétées par une modélisation biologique, des observations météorologiques et des analyses de laboratoire. Les données récoltées sur le terrain sont ensuite analysées et diffusées publiquement par les différents acteurs sous la forme d'un bulletin de santé du végétal (BSV ; Maaf, 2015). Ces bulletins de

santé du végétal donnent des indications aux agriculteurs, telles que l'état sanitaire des cultures et l'évaluation du risque phytosanitaire, incluant des seuils de risques (Masa, 2016a, 2016b). Sur le terrain, différents outils d'aide à la décision (OAD) permettent d'évaluer le risque lié à la présence des bioagresseurs et de faire des recommandations sur les mesures à adopter (Jørgensen *et al.*, 2014).

Une fois la présence de bioagresseurs observée, son impact potentiel sur les cultures est évalué à travers des seuils de nuisibilité et des seuils de traitement. Laget *et al.* (2015) définissent le seuil de nuisibilité comme « la densité de population / d'inoculum ou niveau d'infestation / d'infection à partir duquel une diminution de rendement ou de qualité est statistiquement décelable », et le seuil d'intervention économique comme la « densité de population / d'inoculum ou niveau d'infestation / d'infection à partir duquel l'effet sur la diminution du rendement ou de la qualité est supérieur au coût des moyens mis en œuvre pour lutter contre le bioagresseur ». Les seuils de nuisibilité et d'intervention économique donnent des indications aux agriculteurs pour déclencher une intervention curative, principalement au moyen de la lutte chimique (Laget *et al.*, 2015 ; Ramsden *et al.*, 2017). En Europe, la directive 2009/128/CE incite à l'utilisation de ces seuils pour raisonner les traitements chimiques : « en s'appuyant sur les résultats de la surveillance, l'utilisateur professionnel doit décider s'il doit ou non et quand appliquer des mesures phytopharmaceutiques. Des seuils scientifiquement solides et robustes sont des éléments essentiels à la prise de décision ».

Cependant, en pratique, l'alerte d'un dépassement de seuil déclenche quasi automatiquement un traitement des plantes cultivées par des pesticides chimiques (atelier d'experts⁹, novembre 2020). On observe ainsi que beaucoup de pesticides chimiques sont appliqués de manière assurancielle, avant que les seuils ne soient dépassés (Ramsden *et al.*, 2017 ; Reising *et al.*, 2012). Cela est lié d'une part au faible coût des pesticides, mais aussi à des seuils qui ne sont pas toujours adaptés aux spécificités du système de culture concerné et aux pratiques culturelles locales (Ramsden *et al.*, 2017).

3. Les évolutions passées des stratégies de protection des cultures

Berne J.-A., Mora O.

I Après-guerre, un usage systématique des pesticides pour soutenir le développement de systèmes agricoles productifs

Si l'utilisation d'insecticides ou de fongicides issus de minéraux ou d'extraits de plantes existe depuis longtemps, le développement de pesticides synthétiques et leur usage

9. La référence à un atelier d'experts tout au long de l'ouvrage indique que les éléments précisés proviennent des jugements des groupes d'experts qui se sont réunis pendant l'étude de prospective. Le rôle et la composition des groupes d'experts mobilisés sont décrits dans les annexes 1 et 3.

massif commencent après la Seconde Guerre mondiale (Oerke, 2006 ; Schiffers, 2012), quand les pays européens ont cherché à augmenter leur production agricole afin d'atteindre une sécurité alimentaire (Jacquet et Jouan, 2022a ; Zobbe, 2001).

Avant 1940, ce sont principalement des stratégies préventives qui sont mobilisées. Les pratiques culturales et mécaniques en agriculture consistent à gérer les bioagresseurs, grâce à la diversification des cultures dans le temps et dans l'espace, au désherbage manuel et à la pratique du labour (Buckwell *et al.*, 2020 ; Jacquet et Jouan, 2022a) ou à l'utilisation de variétés résistantes (*ibid.*).

Après la Seconde Guerre mondiale, les pays européens vont chercher à augmenter leur production agricole afin d'atteindre une sécurité alimentaire (Zobbe, 2001). Les recherches sur les gaz de combat et les avancées en matière d'industrie chimique vont permettre de découvrir de nouveaux composés organiques qui seront directement utilisés en agriculture comme pesticides (Bonnefoy, 2012 ; Russel, 2005). Les pesticides chimiques deviennent un élément clé de l'intensification agricole, notamment pour maîtriser les risques liés aux bioagresseurs (Bonnefoy, 2012). En Europe, l'accroissement de la productivité et de la production agricole est soutenu et favorisé par la politique agricole commune (Zobbe, 2001).

Plusieurs facteurs vont permettre l'intensification agricole : la sélection génétique orientée vers des variétés à haut rendement, l'utilisation d'intrants azotés et de pesticides, ainsi que la mécanisation (Jacquet et Jouan, 2022a ; Buckwell *et al.*, 2020).

Les programmes de sélection s'orientent vers des variétés modernes à haut potentiel de rendement, mais qui sont sensibles aux attaques des bioagresseurs (Lamine *et al.*, 2010 ; Bonnin *et al.*, 2014). De plus, les pratiques culturales d'intensification qui permettent une augmentation des rendements fragilisent les cultures. Par exemple, en céréaliculture, les semis précoces permettent d'allonger le cycle cultural, mais augmentent le risque de levée d'adventices ; la forte densité de semis permet d'accroître la surface foliaire, mais augmente le risque de maladies ; et l'utilisation importante de fertilisation minérale assure des rendements élevés, mais augmente le risque de maladies (Meynard et Girardin, 1991). La même problématique se retrouve sur les cultures pérennes (Plénet *et al.*, 2010).

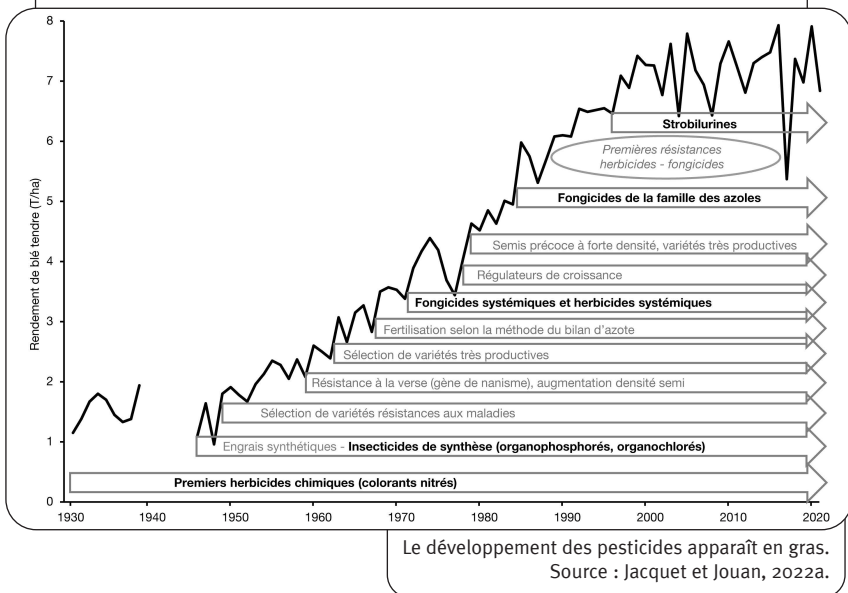
Ces pratiques d'intensification ne seraient pas possibles sans le recours important aux pesticides chimiques, devenant la « clé de voûte » de ces systèmes de culture, et dont l'usage est facilité par la mécanisation (Jacquet et Jouan, 2022a ; Jeanneaux, 2018). La recherche publique et privée va beaucoup travailler sur le fonctionnement biologique des bioagresseurs, afin de produire de nouvelles molécules efficaces pour lutter contre eux et développer des stratégies de défense des cultures (Buckwell *et al.*, 2020).

Les politiques publiques, particulièrement la politique agricole commune (PAC) au travers du soutien des prix et de la garantie de débouchés, vont soutenir cette intensification de la production agricole (Jacquet et Jouan, 2022a).

Le lien entre l'utilisation des pesticides, diverses évolutions techniques et l'augmentation du rendement transparaît dans l'exemple de l'évolution du rendement du blé tendre en France (figure 1.2). On observe que la multiplication par huit du rendement du blé en France entre 1950 et 2020 est contemporaine de l'utilisation de nouvelles familles de pesticides, d'engrais synthétiques et de variétés productives.

L'intensification de l'agriculture en Europe s'est aussi accompagnée d'une spécialisation et d'une simplification des systèmes de culture (Hansen, 2020 ; Schott *et al.*, 2010) et d'une simplification des paysages (Jongman, 2002 ; Tschardtke *et al.*, 2005). Ainsi, les systèmes de polyculture-élevage ont progressivement disparu au profit d'élevages intensifs, concentrés dans certaines régions d'un côté ; et de la « céréalisation » des régions les plus favorables à la culture de l'autre côté (Roguet *et al.*, 2015 ; Schott *et al.*, 2010, 2018 ; Eurostat, 2022). Cela a contribué à diminuer les surfaces en prairies permanentes (Schott *et al.*, 2018), considérées comme des habitats semi-naturels favorisant la présence d'ennemis naturels des bioagresseurs (Bianchi *et al.*, 2006). Les paysages agricoles se sont homogénéisés, avec un agrandissement des parcelles et une forte diminution des habitats semi-naturels (Jongman, 2002 ; Tschardtke *et al.*, 2005), créant des conditions favorables à la présence de bioagresseurs et défavorables à celle de leurs ennemis naturels (Bianchi *et al.*, 2006 ; Chaplin-Kramer *et al.*, 2011 ; Rusch *et al.*, 2016b ; Grilli, 2010).

Figure 1.2. Lien entre l'évolution du rendement du blé tendre en France et diverses innovations techniques, dont le développement des pesticides



Ainsi, les éléments qui ont permis d'augmenter la production et la productivité agricole ont paradoxalement contribué à rendre les systèmes de culture sensibles aux bioagresseurs et dépendants aux pesticides. Ces dynamiques de transformation ont été, à partir des années 1950, décrites dans toute l'Europe, bien que portées par des politiques différentes : en Europe de l'Est, ces transformations ont été induites par la collectivisation des terres au sein de grandes fermes d'État et par la planification économique, contrairement à l'Europe de l'Ouest où ce sont les forces du marché et les politiques publiques qui ont poussé ces transformations (Jepsen *et al.*, 2015).

■ Une prise de conscience progressive des limites à l'utilisation des pesticides dans les systèmes agricoles, sans réelle diminution de leur usage

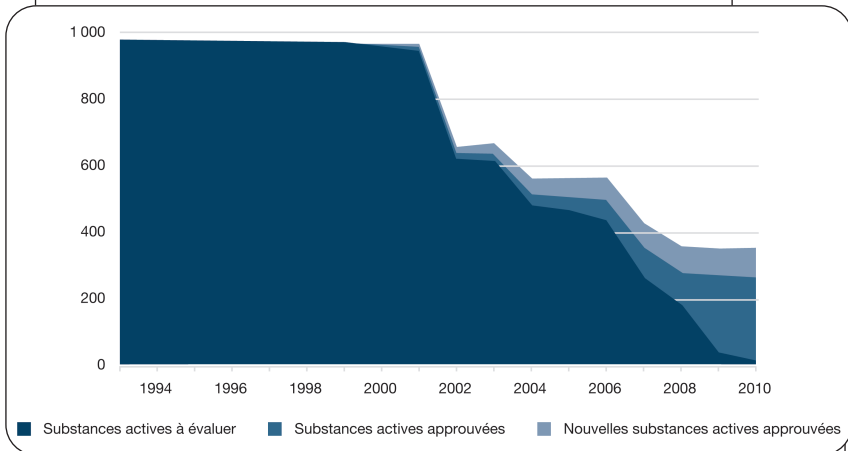
Ce système agricole intensif, basé sur l'usage des pesticides chimiques pour la protection des cultures, est critiqué dès les années 1960 pour son impact négatif sur l'environnement et la santé humaine. L'une des premières lanceuses d'alerte sur le sujet est l'Américaine Rachel Carson qui publie en 1968 en français le livre *Printemps silencieux*, qui met en lumière le lien entre le recours massif aux pesticides, la détérioration de l'état de santé de la population américaine, et la dégradation de la faune sauvage par la chimie de synthèse (Jouzel, 2019). Des scandales éclatent dès les années 1960 aux États-Unis, suite à des problèmes de santé de travailleurs agricoles ayant manipulé des pesticides (*ibid.*).

À partir des années 1990, face aux connaissances croissantes sur les impacts négatifs des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement, plusieurs politiques publiques européennes sont mises en place afin de limiter l'usage des pesticides et leurs impacts (Jepsen *et al.*, 2015). La sous-section sur les politiques publiques (chapitre 4, section 2, p. 182-191) apporte plus de détails sur les différentes politiques publiques liés aux pesticides. Il s'agit notamment en Europe de la directive 91/414/CEE, qui instaure un premier cadre d'harmonisation des procédures d'autorisation de mise sur le marché des substances actives, révisée en 2009 à travers le règlement n° 1107/2009 (Jacquet et Jouan, 2022a). Elle prévoit que seules les substances dont l'évaluation démontre qu'elles n'ont pas d'effet nocif sur la santé humaine ou d'effet inacceptable sur l'environnement soient utilisées en Europe (Barthélémy *et al.*, 2022). La PAC intègre à partir des années 1990 des mesures visant à limiter l'usage des pesticides, comme les mesures agro-environnementales qui sont des primes incitatives de soutien aux changements de pratiques favorables à l'environnement (Kirsch, 2017). En 2000, la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE fixe des seuils de qualité des eaux, notamment en matière de teneurs en pesticides. Aux échelles nationales, des plans de réduction des usages de pesticides sont mis en place (par exemple, le plan Écophyto en France dès 2008, ou la taxe sur les pesticides au Danemark à partir de 1996).

Par ailleurs, l'utilisation importante des pesticides va générer des problèmes de résistances des bioagresseurs. Dès les années 1970, ces résistances sont identifiées comme une menace pour la production agricole (Russel, 2005), d'autant plus que les résistances peuvent apparaître et s'étendre rapidement en quelques années (Aubertot *et al.*, 2005b). Les agriculteurs se lancent alors dans une forme de « course aux armements » en utilisant de nouvelles familles de pesticides disponibles sur le marché afin de contrer ces résistances (Jacquet et Jouan, 2022a).

On observe à partir des années 1990 une diminution du nombre de substances actives de pesticides autorisées en Europe, liée aux connaissances de leurs effets sur l'environnement et la santé humaine, à la diminution des investissements des industriels producteurs de pesticides face à des coûts importants de mise sur le marché et à un marché de plus en plus compétitif (Russel, 2005). Ainsi, depuis la mise en place de la directive 91/414/CEE, plus de la moitié des substances actives (figure 1.3) ont été retirées du marché européen (Hillocks, 2012 ; Buckwell *et al.*, 2020).

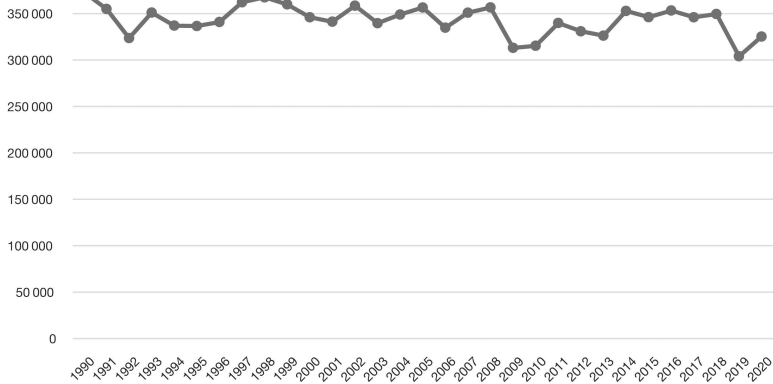
Figure 1.3. Évolution du nombre de substances actives disponibles dans l'Union européenne entre 1993 et 2010, catégorisées en substances actives à évaluer, substances actives autorisées et nouvelles substances actives approuvées



Source : EC, 2018.

Toutefois, et malgré la diminution des substances actives disponibles ainsi que les nombreuses politiques publiques mises en place au sein de l'Union européenne, l'usage des pesticides chimiques n'a pas fortement diminué au sein de l'Europe depuis les années 1990, comme l'illustre la figure 1.4. On observe plutôt une stabilité de l'usage des pesticides avec des fluctuations ponctuelles.

Figure 1.4. Évolution des ventes des pesticides en tonnes de substances actives au sein de l'Union européenne entre 1990 et 2020



Sources : données FAOSTat (2020) ; traitement des auteurs.

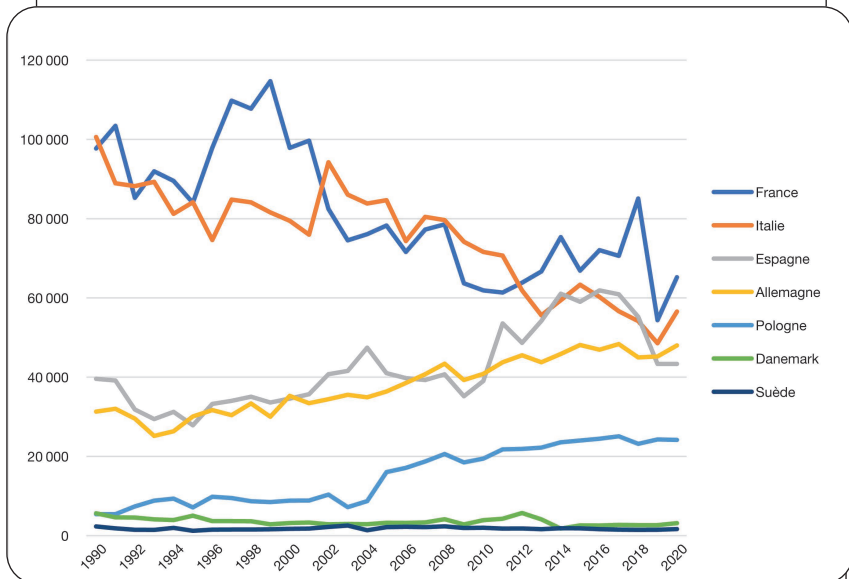
Cette moyenne cache néanmoins des variations importantes selon les pays de l'Union européenne, comme le montre la figure 1.5 qui compare l'évolution de l'usage des pesticides entre plusieurs États membres (France, Italie, Espagne, Allemagne, Pologne, Danemark et Suède). Depuis les années 1990, on observe une tendance à la diminution de l'usage des pesticides en France, en Italie et au Danemark. Au contraire, il y a une nette tendance à l'augmentation de leurs usages en Allemagne, en Espagne et en Pologne.

La diminution du nombre de pesticides disponibles interroge les systèmes agricoles reposant fortement sur l'usage de pesticides pour la protection des cultures. En effet, les agriculteurs ont accès à de moins en moins de pesticides pour gérer les bioagresseurs. Ils utilisent donc un nombre restreint de familles de pesticides, ce qui augmente le risque d'apparition de résistances chez les bioagresseurs (Chauvel *et al.*, 2012).

Quoiqu'il en soit, et malgré les politiques publiques mises en place, les systèmes agricoles européens restent dépendants aux pesticides, et au-delà, c'est l'ensemble du système alimentaire qui est construit autour de leur usage, de l'amont avec une sélection variétale orientée vers des variétés productives mais peu résistantes aux bioagresseurs, jusqu'à l'aval avec des standards de production et des collectes de larges volumes d'un petit nombre de cultures dépendants de l'usage de pesticides (Lamine *et al.*, 2010 ; Meynard *et al.*, 2018). C'est ce que les auteurs qualifient de verrouillage sociotechnique ou *lock-in (ibid.)*.

Cependant, des systèmes de culture visant à limiter ou supprimer totalement l'usage de pesticides chimiques se sont développés depuis les années 1970, notamment en ayant recours aux produits de biocontrôle, au travers de l'agriculture biologique, la protection intégrée des cultures et l'agroécologie.

Figure 1.5. Évolution des ventes de pesticides en tonnes de substances actives au sein de différents pays de l'Union européenne entre 1990 et 2020



Source : données FAOStat (2020) ; traitement des auteurs.

■ La substitution partielle des pesticides chimiques par des produits de biocontrôle

Les produits de biocontrôle sont présentés comme une solution alternative intéressante aux pesticides chimiques, car ils sont considérés comme moins dangereux (Villaverde *et al.*, 2014). Les produits de biocontrôle sont des organismes vivants ou des substances naturelles ; ils sont divisés en quatre catégories : les macro-organismes, les micro-organismes, les médiateurs chimiques et les substances d'origine naturelle (Busson *et al.*, 2022).

Le marché du biocontrôle connaît un grand développement ces dernières années. D'après Ravensberg (2015), il représentait 549 millions d'euros en Europe en 2014 et connaissait une croissance annuelle de 15 à 20 %. Il reste néanmoins un petit secteur au sein des produits phytosanitaires, représentant environ 10 % du marché de la protection des cultures en Europe en 2019 (IBMA, 2021).

Les substances de biocontrôle disponibles sur le marché européen sont en forte croissance. En effet, depuis 2011, le nombre de substances de biocontrôle autorisées au niveau de l'Union européenne augmente régulièrement, contrairement au nombre de substances chimiques autorisées qui diminuent (Marchand, 2022). Les produits

de biocontrôle restent néanmoins encore minoritaires parmi les substances actives autorisées en Europe. En 2018, ils représentaient 36,8 % des substances autorisées (Robin et Marchand, 2019).

Actuellement, la réglementation qui encadre la mise sur le marché des produits de biocontrôle est la même que celle des pesticides synthétiques, ce qui peut être vu comme un obstacle au développement de ces produits (Bourguignon *et al.*, 2017). Par ailleurs, ces produits, présentés comme solution de substitution, ne sont pas disponibles pour tous les bioagresseurs ainsi que pour toutes les cultures. De plus, leurs impacts potentiels sur l'environnement méritent d'être évalués. Par exemple, des macro-organismes introduits peuvent devenir des espèces envahissantes (Amichot *et al.*, 2022).

■ Le développement d'une agriculture n'utilisant aucun pesticide de synthèse : l'agriculture biologique

L'agriculture biologique est une des formes d'agriculture sans pesticides, qui s'est développée au travers d'un système de certification mobilisant un cahier des charges spécifique. Il s'agit d'« un mode de production basé sur des pratiques agricoles qui excluent l'utilisation de biocides de synthèse et des organismes génétiquement modifiés (OGM) ou des produits obtenus à partir d'OGM » (Sanner *et al.*, 2022). L'agriculture biologique cherche aussi à limiter son impact environnemental et utilise des méthodes prophylactiques pour gérer les bioagresseurs (*ibid.*). Un nombre limité de pesticides, incluant les produits de biocontrôle ou le cuivre, y sont autorisés (Buckwell *et al.*, 2020).

L'agriculture biologique est pratiquée en Europe depuis les années 1920. Elle se développe dans les années 1970 avec une reconnaissance par certains États où se mettent en place les premières certifications biologiques (Reganold et Watcher, 2016). La première certification européenne, harmonisant les différentes certifications nationales, est mise en place en 1991 (Barrett *et al.*, 2002).

En 2020, les surfaces en agriculture biologique couvrent environ 14,5 millions d'hectares, soit 9,1 % de la surface agricole utile européenne (surfaces certifiées et en conversion comprises ; Eurostat, 2023). Cela correspond à une augmentation de 56 % de la surface en agriculture biologique par rapport à 2012 (*ibid.*). Les productions végétales non permanentes (céréales, légumes frais, etc.) représentent 46 % des surfaces totales en agriculture biologique, les prairies permanentes 42 % et les cultures permanentes 12 % (*ibid.*). Pour autant, la part de la surface agricole nationale dédiée à l'agriculture biologique varie fortement au sein de l'Union européenne, les États membres ayant la plus grande part de leur surface en agriculture biologique sont l'Autriche (25 %), l'Estonie (22 %) et la Suède (20 %), tandis que la France se situe dans la moyenne européenne avec près de 10 % de la surface agricole consacrée à l'agriculture biologique.

L'AB intègre dans son cahier des charges d'autres critères que la non-utilisation de pesticides de synthèse, notamment la non-utilisation de fertilisation minérale, ou encore, pendant la transformation alimentaire, une liste réduite d'additifs utilisables.

L'ensemble de ces critères sont contraignants pour les acteurs, notamment pour les agriculteurs. Ils peuvent impacter les rendements des productions, et donc, en l'absence de soutien économique (ou de prix du marché) permettant de compenser ces pertes, peuvent limiter l'adoption plus massive de l'agriculture biologique.

I La protection intégrée des cultures pour limiter les usages de pesticides et ses limites

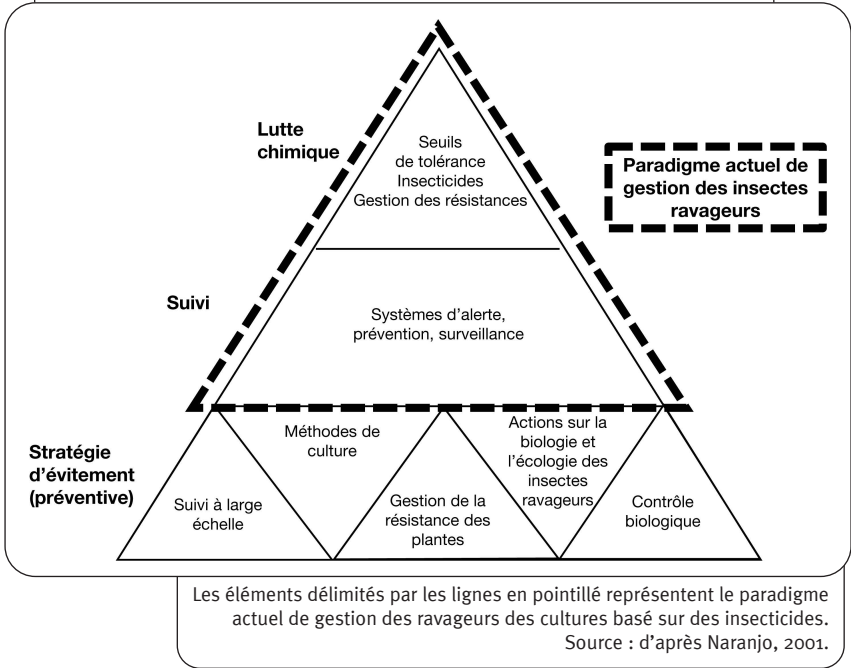
La protection intégrée des cultures (IPM, pour *integrated pest management* en anglais) est un modèle de protection des cultures qui a émergé à la fin des années 1950 afin de répondre aux problèmes de résistance aux pesticides des bioagresseurs (Deguine *et al.*, 2021). Elle est définie par la FAO comme « l'examen minutieux de toutes les techniques disponibles de lutte contre les ravageurs et l'intégration ultérieure de mesures appropriées qui découragent la prolifération des populations de ravageurs tout en maintenant l'usage des pesticides et le recours à d'autres interventions à des niveaux économiquement justifiés et en réduisant au minimum les risques pour la santé humaine et l'environnement. La protection intégrée met l'accent sur le développement de cultures saines avec le moins de perturbations possible sur les systèmes agroécologiques et promeut les mécanismes naturels de lutte contre les ravageurs » (FAO, 2018a).

Beaucoup de définitions de l'IPM ont été développées depuis les années 1950. On y retrouve différents enjeux d'intégration et de combinaison des techniques de gestion des bioagresseurs, de recherche d'une viabilité socioéconomique tout en diminuant l'usage des pesticides, et d'usage de pesticides chimiques en dernier recours, en se basant sur des seuils (Deguine *et al.*, 2021).

Les principes et stratégies de l'IPM sont souvent représentés sous la forme d'une pyramide de la protection des cultures (voir par exemple : Naranjo, 2001 ; figure 1.6). Cette pyramide représente des actions à prioriser (stratégie d'évitement), à la base de la pyramide ; et d'autres à n'utiliser qu'en dernier recours, en haut de la pyramide. Le haut de la pyramide délimité par des pointillés correspond au paradigme conventionnel de protection des cultures centré sur l'usage de pesticides chimiques, s'appuyant sur la surveillance des bioagresseurs et la définition de seuils d'intervention.

La forme de pyramide illustre une stratégie de décision en plusieurs étapes, où la priorité est donnée à des actions préventives (ou proactives), à la base de la pyramide ; tandis que les actions curatives (ou réactives), au sommet, ne sont mises en œuvre que si les actions préventives sont insuffisantes pour gérer les bioagresseurs ou maintenir les dégâts en dessous de seuils (*ibid.*). Les actions à la base de la pyramide mobilisent des processus écologiques basés sur la biodiversité faisant appel à la gestion du paysage et la gestion des cultures. Les actions en haut de la pyramide remplacent les pratiques fondées sur la biodiversité par des intrants extérieurs tels que des pesticides synthétiques et des intrants abiotiques. Le monitoring au centre de la pyramide éclaire les actions à mettre en œuvre (*ibid.*).

Figure 1.6. Stratégie de protection intégrée des cultures représentée sous forme de pyramide (pour les insectes ravageurs)



Malgré une promotion de l'IPM depuis les années 1950, notamment au travers de la directive européenne 2009/128/CE, ces principes ont été peu adoptés jusqu'à aujourd'hui (Jacquet et Jouan, 2022b ; Deguine *et al.*, 2021).

L'échec de la diffusion de l'IPM pour réduire l'usage des pesticides peut s'expliquer par plusieurs facteurs : la profusion de définitions et d'interprétations de l'IPM rendant le concept flou, l'écart entre les concepts de l'IPM et sa pratique, et le manque de compréhension des concepts écologiques sous-tendant l'IPM (Deguine *et al.*, 2021). De plus, l'IPM présente souvent une juxtaposition de techniques de protection des cultures et non une réelle intégration de différentes méthodes de protection des cultures (Stenberg, 2017). Ehler (2006) considère que l'IPM est souvent appliquée non pas en tant que protection intégrée des cultures (*integrated pest management*) mais en tant que gestion intégrée des pesticides (*integrated pesticide management*), c'est-à-dire comme un ensemble d'outils permettant une application raisonnée des pesticides (basée sur la surveillance et les seuils). Cette vision de l'IPM conduit à une protection des cultures qui reste centrée sur l'usage de pesticides chimiques (Ehler, 2006).

Deguine *et al.* (2021) identifient six barrières à l'adoption de l'IPM à grande échelle : le manque de connaissances des agriculteurs, particulièrement sur les concepts écologiques ; l'aversion au risque, l'IPM étant perçue comme risquée par rapport à l'utilisation de pesticides ; les conflits d'intérêts des conseillers agricoles et le lobbying des industries agrochimiques ; le manque de technologies adaptées aux contextes locaux ; le manque de politiques claires et efficaces ; et enfin le manque d'actions collectives et interdisciplinaires.

■ Une nouvelle stratégie émergente : la protection agroécologique des cultures

Face aux limites de l'IPM, des auteurs (Deguine *et al.*, 2021) ont proposé une protection agroécologique des cultures. Cette dernière (ACP, pour *Agricultural crop protection* en anglais) est issue de l'agroécologie et permet d'appliquer les principes de celle-ci à la protection des cultures (*ibid.*). Elle a vu le jour à partir des années 2000 (Deguine et Ratnadass, 2017) et demeure aujourd'hui émergente dans ses applications.

Tout comme l'agroécologie, l'ACP s'appuie sur les fonctions écologiques des écosystèmes, pour améliorer leur santé en développant les interactions entre les différentes communautés d'êtres vivants en leur sein (Deguine *et al.*, 2021). Pour cela, l'ACP se base sur deux piliers : la gestion des communautés écologiques et la gestion du sol (Deguine et Ratnadass, 2017). Ces deux dernières reposent sur la diversification des plantes dans le temps et l'espace, ainsi que sur l'amélioration de la qualité du sol (matière organique et fonctions biologiques) au travers des pratiques culturales durables et écologiques (*ibid.*). De plus, l'ACP recommande de limiter au maximum toutes les pratiques qui pourraient impacter négativement la biodiversité et la santé des écosystèmes comme l'usage d'intrants chimiques ou la monoculture (Deguine et Ratnadass, 2017).

À partir de ces principes d'agroécologie appliqués à la protection des cultures, Deguine *et al.* (2009) proposent une stratégie de protection des cultures présentée dans Deguine et Ratnadass (2017). Une phase essentielle de cette stratégie est la mise en place de mesures préventives dans l'espace et dans le temps, à savoir :

- la culture de plantes en bonne santé et le maintien d'un sol en bonne santé au travers de différentes pratiques favorisant les régulations biologiques, comme l'utilisation de variétés adaptées, une fertilisation et une irrigation durable, un travail du sol réduit, une diversification temporelle de la végétation ;
- la réduction des populations de bioagresseurs et le renforcement des populations d'ennemis naturels des bioagresseurs (de la parcelle à l'agroécosystème), grâce à la gestion des habitats en bordure de parcelle et la diversification végétale intraparcellaire, notamment l'usage de plantes pièges et de techniques *push-pull* ;
- l'utilisation de pratiques concertées dans le temps et dans l'espace, au sein des agroécosystèmes.

Cette stratégie demande de prendre en compte différentes échelles spatiales et temporelles, allant de la parcelle à l'agroécosystème (Deguine et Ratnadass, 2017).

Enfin, Deguine et Ratnadass (2017) définissent sept caractéristiques de la protection agroécologique des cultures : (i) l'utilisation des bases scientifiques de l'agroécologie, (ii) les deux axes des pratiques que sont la biodiversité et la santé du sol, (iii) la priorité donnée aux mesures préventives, (iv) l'usage de traitements curatifs seulement en dernier ressort, (v) les trois piliers de l'ACP que sont la prophylaxie, la gestion des habitats et le contrôle biologique par conservation, (vi) l'élargissement des échelles (spatiales, temporelles et de concertation), et (vii) les approches globales (systémiques, collectives, participatives, multicritères).

L'ACP va plus loin que l'IPM dans la réflexion en basant la protection des cultures sur la bonne santé de l'agroécosystème, ce qui implique non pas seulement d'éviter les bioagresseurs mais d'assurer une bonne gestion de la biodiversité et de la santé du sol. L'usage des pesticides n'est plus à limiter pour prévenir une pollution et ses impacts négatifs, mais est à éviter car il peut remettre en cause la base même de la protection des cultures, à savoir la santé de l'écosystème.

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, la protection des cultures dans les systèmes agricoles conventionnels se base essentiellement sur l'utilisation de pesticides chimiques, ce qui a permis d'augmenter fortement la production agricole. Cette dépendance aux pesticides existe à l'échelle de l'ensemble du système alimentaire. Depuis les années 1990, l'impact des pesticides chimiques sur l'environnement et la santé humaine est devenu une préoccupation sociétale majeure. Ainsi, de nombreuses mesures ont été mises en place pour limiter leur usage, sans réelle remise en question des systèmes de culture existants. Certains systèmes limitant l'usage des pesticides se sont mis en place comme l'AB, l'IPM ou l'ACP. Ces approches montrent qu'une stratégie de protection des cultures sans pesticides chimiques nécessite une re-conception du système de culture, et donc l'exploration et l'articulation des pratiques existantes et à venir pour bâtir une protection des cultures sans pesticides chimiques.

2. Les leviers possibles de protection des cultures pour des systèmes de culture sans pesticides chimiques

Ce chapitre présente la réflexion prospective sur les systèmes de culture sans pesticides chimiques. Il s'appuie dans une première section sur la présentation des modes d'action existants qui pourraient être mobilisés pour une protection des cultures sans pesticides chimiques. Une deuxième section identifie les signaux faibles pour imaginer des stratégies de protection des cultures sans pesticides chimiques et examine les effets potentiels du changement climatique à long terme. La troisième section présente les hypothèses de changement pour une protection des cultures et des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050. Ces hypothèses, ainsi que les résultats des sections 1 et 2, s'appuient sur des analyses bibliographiques de la littérature scientifique, et sur les travaux de groupes d'experts organisés dans le cadre d'une série de réunions sur la protection des cultures, la résistance des plantes et les systèmes de culture (annexe 3).

1. Six modes d'action pour une protection des cultures sans pesticides chimiques

Berne J.-A., Mora O., Drouet J.-L.

Pour construire une protection des cultures sans pesticides chimiques, six modes d'action contre les bioagresseurs (ravageurs, agents pathogènes et adventices) ont été identifiés par un travail de revue bibliographique et par deux ateliers thématiques avec des groupes d'experts (intitulés « Réduire la pression des bioagresseurs » et « Renforcer la résistance des plantes » ; voir la liste des experts contributeurs aux groupes thématiques dans le tableau A.6) : (i) le biocontrôle ; (ii) la lutte physique ; (iii) la gestion temporelle par les pratiques culturales ; (iv) la gestion spatiale de la diversité intraparcellaire ; (v) la gestion des paysages ; (vi) la sélection variétale. Chaque mode d'action inclut un ensemble de leviers d'action qui sont décrits dans le tableau 2.1.

Les six modes d'action mettent l'accent sur plusieurs dimensions des stratégies de protection des cultures comme la gestion temporelle et spatiale des ravageurs, l'échelle du paysage, la diversité au sein de la parcelle, et la différence entre les stratégies de prophylaxie et de lutte.

Tableau 2.1. Les six modes d'action pour une protection des cultures sans pesticides chimiques

Modes d'action sur les bioagresseurs	Leviers d'action
Biocontrôle	Macro-organismes
	Micro-organismes
	Stimulateurs de défense des plantes et biostimulants
	Substances naturelles
	Médiateurs chimiques
Lutte physique	Lutte thermique, électromagnétique, pneumatique et acoustique
	Barrières physiques
Gestion temporelle par les pratiques culturales	Calendrier cultural
	Fertilisation et irrigation
	Gestion des couverts et des résidus
	Conduite architecturale des arbres
	Travail du sol et désherbage mécanique
	Diversification temporelle (succession des cultures et cultures intermédiaires)
Gestion spatiale de la diversité intraparcellaire des cultures	Diversification intraspécifique : mélanges variétaux et « variétés population »
	Diversification interspécifique (cultures associées et agroforesterie)
Gestion des paysages	Composition du paysage
	Configuration du paysage (arrangement spatial des éléments du paysage)
Sélection variétale	Résistances aux bioagresseurs et nouveaux objectifs de sélection : cortège microbien, mélanges variétaux, associations de cultures (pérennes et permanentes) et autres services non liés à la production
	Porte-greffe et greffon

Les modes d'action comprennent différents leviers d'action. Certains leviers peuvent être connus et appliqués depuis longtemps (par exemple, le travail du sol pour le contrôle des adventices), d'autres sont des pratiques encore émergentes.

Les six modes d'action impliquent des interventions sur les populations de bioagresseurs, sur les interactions entre les plantes et les bioagresseurs, et sur les populations d'ennemis naturels des bioagresseurs (pouvant réguler les populations de bioagresseurs). Ils engagent différentes stratégies de gestion des bioagresseurs sans pesticides chimiques :

- en agissant directement sur les bioagresseurs qui sont présents (biocontrôle, lutte physique) ;

- en évitant les phases sensibles de croissance des plantes cultivées et le développement des populations de bioagresseurs (par la gestion temporelle par les pratiques culturales et la gestion spatiale de la diversité des cultures à l'intérieur des parcelles) ;
- en agissant sur les différentes phases du cycle de vie des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels (par la gestion temporelle par les pratiques culturales, la gestion spatiale de la diversité des cultures à l'intérieur des parcelles et la gestion du paysage) ;
- en agissant sur les populations d'ennemis naturels (par la gestion temporelle, la gestion spatiale de la diversité des cultures à l'intérieur des parcelles et la gestion des paysages) ;
- en renforçant la résilience des plantes face aux bioagresseurs.

En lien avec ces six modes d'action, l'épidémiosurveillance occupe également une place centrale dans la gestion des bioagresseurs. En effet, bien qu'elle ne soit pas un mode d'action en soi, car elle ne permet pas d'agir directement sur les bioagresseurs, la surveillance épidémiologique est un outil permettant de mobiliser différents leviers d'action, classiquement dans le cadre de stratégies de lutte.

Cette section présente les six modes d'action pour une protection des cultures sans pesticides chimiques, puis dans un dernier paragraphe traite de la question du suivi des bioagresseurs et de l'épidémiosurveillance.

■ Les produits de biocontrôle

Dans sa définition classique en France, « le biocontrôle est un ensemble de méthodes de protection des végétaux (...) fondées sur les mécanismes et interactions qui régissent les relations entre espèces dans le milieu naturel » (MASA, 2022). Le biocontrôle¹⁰ « couvre (...) 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 » (Malausa *et al.*, 2022).

Ce paragraphe se concentre sur les différents agents et produits de biocontrôle, en suivant la définition française, ils sont répartis en deux catégories : d'une part, les agents biologiques tels que les macro-organismes (insectes ou nématodes) ou les micro-organismes (virus, bactéries, champignons ou oomycètes) ; et d'autre part, les produits tels que les médiateurs chimiques (phéromones ou kairomones) ou les substances naturelles d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale. Les stratégies de lutte biologique par conservation sont présentées p. 64-70 (dans « La gestion des paysages »).

10. Il peut exister une ambiguïté avec le terme anglais *biocontrol* qui n'a pas le même sens que le terme français *biocontrôle* (Deguine et Ledouble, 2022). En anglais, les termes *biocontrol* et *biological control* ont un sens similaire ; ils recouvrent quatre grandes stratégies de protection des cultures (Eilenberg *et al.*, 2001) : la lutte biologique par acclimatation, la lutte biologique par inondation, la lutte biologique par inoculation et la lutte biologique par conservation.

L'utilisation de macro-organismes

Dans le biocontrôle, les macro-organismes peuvent être utilisés au travers de trois techniques : (i) la lutte biologique par acclimatation, (ii) la lutte biologique par augmentation et (iii) la technique de l'insecte stérile.

La lutte biologique par acclimatation avec des macro-organismes

La lutte biologique par acclimatation, qui est le mode le plus ancien de lutte biologique, consiste à introduire intentionnellement « un agent de contrôle biologique exotique, généralement coévolué, pour son établissement permanent et en vue du contrôle à long terme d'un bioagresseur » (Eilenberg *et al.*, 2001).

À l'origine, cette technique a été utilisée pour lutter contre les insectes ravageurs ou les adventices (Eilenberg *et al.*, 2001). Elle visait à lutter contre les espèces envahissantes de ravageurs introduites en rétablissant un équilibre hôte/ennemi naturel. Même si seulement 10 % des introductions fournissent un contrôle biologique efficace après l'établissement (*ibid.*), lorsque l'introduction est réussie, elle peut apporter de réels avantages agronomiques et économiques (van Lenteren, 2012 ; Borowiec et Sforza, 2020).

Cependant, l'introduction d'espèces exotiques peut avoir des effets néfastes. Par exemple, la coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis*, utilisée pour la lutte biologique contre les pucerons et les psylles, est devenue une espèce envahissante en Amérique du Nord et en Europe, ayant des impacts sur les arthropodes non ciblés, menaçant la biodiversité indigène, infligeant des dommages aux productions fruitières et envahissant les habitations (Koch et Galvan, 2008 ; Roy et Wajnberg, 2008). De même, l'introduction du charançon *Rhinocyllus conicus* en Amérique du Nord pour lutter contre le chardon penché a eu des impacts négatifs sur les plantes et les insectes indigènes (Gassmann et Louda, 2001). Pour limiter les risques sur les espèces non ciblées, Louda *et al.* (2003) ont émis une série de recommandations, dont le fait d'éviter d'utiliser des espèces généralistes ou d'incorporer plus d'informations écologiques, d'autres auteurs préconisent un suivi à long terme durant 8 à 10 ans (Borowiec et Sforza, 2020).

La lutte biologique par augmentation avec des macro-organismes

La lutte biologique par augmentation concerne l'introduction de macro-organismes et de micro-organismes endémiques (Eilenberg *et al.*, 2001). La lutte biologique par augmentation peut être subdivisée en deux méthodes : l'inoculation et l'inondation (*ibid.*). La lutte par inoculation désigne « le lâcher intentionnel d'organismes vivants en tant qu'agents de lutte biologique dans le but qu'ils se multiplient et contrôlent le ravageur pendant une période prolongée, mais pas de façon permanente » et la lutte par inondation décrit un mode d'action similaire mis à part que « le contrôle [biologique] est assuré exclusivement par les organismes libérés eux-mêmes » (*ibid.*). Dans la pratique, il existe un continuum entre l'inoculation et l'inondation dans les stratégies de biocontrôle par augmentation (Bout *et al.*, 2020).

La lutte biologique par augmentation est principalement utilisée pour les productions à haute valeur ajoutée, sous serre pour les légumes et les plantes ornementales, ou en extérieur pour les fraises et les vignobles (van Lenteren *et al.*, 2018). Cependant, pour les autres cultures de plein champ, l'introduction de *Trichogramma brassicae* dans les parcelles de maïs permet de lutter avec succès contre la pyrale du maïs (Razinger *et al.*, 2016).

Cette technique comprend certains défis, les macro-organismes introduits pouvant avoir des difficultés à s'établir et à se maintenir s'ils ne disposent pas de suffisamment de ressources, notamment s'ils manquent de proies, d'hôtes, de sources de nourriture alternative ou de sites de nidification ou d'abris (Bout *et al.*, 2020). Une solution consiste à leur apporter des ressources alternatives, par exemple en établissant des plantes compagnes accueillant des pontes et des hôtes, ou en leur apportant directement des ressources comme des œufs, du pollen, etc. (*ibid.*). Il existe aussi des risques liés à cette technique de biocontrôle : les macro-organismes introduits peuvent ponctuellement produire des dégâts sur les cultures ou interférer avec d'autres auxiliaires des cultures (*ibid.*).

La technique de l'insecte stérile

La technique de l'insecte stérile vise à réduire progressivement la reproduction de l'insecte visé en réalisant des lâchers massifs de mâles stériles. Elle est généralement utilisée dans le cadre de programmes de lutte intégrée contre les ravageurs à l'échelle d'une région, afin de prévenir le développement de populations de ravageurs à grande échelle (Klassen et Curtis, 2005). Elle nécessite la coopération d'un grand nombre d'acteurs (Oliva *et al.*, 2020). Cette technique a pour avantage d'être très spécifique à un insecte cible et a peu d'impact sur les organismes non ciblés (*ibid.*). Son effet peut prendre fin dès que les lâchers cessent (*ibid.*).

Cependant, cette technique présente certaines limites : elle ne peut contrôler qu'une seule espèce, n'est pas appropriée en situation de crise (car elle agit sur la reproduction et non sur la viabilité), ni adaptée à toutes les échelles et à tous les insectes ravageurs (*ibid.*).

L'utilisation de micro-organismes pour la lutte biologique par augmentation

Tout comme les macro-organismes, les micro-organismes peuvent être utilisés dans le cadre de la lutte biologique par augmentation (voir ci-dessus). Un grand nombre de micro-organismes sont identifiés comme des agents de biocontrôle potentiels pour les maladies des plantes, les insectes ravageurs et les adventices (van Lenteren, 2018). Seule une petite partie d'entre eux sont commercialisés (Bardin et Nicot, 2020). En 2019, 49 souches de micro-organismes étaient enregistrées avec une autorisation de mise sur le marché dans l'Union européenne, principalement des souches de champignons, de bactéries, de virus et d'oomycètes (*ibid.*). Les souches autorisées sont

(par ordre décroissant du nombre de souches disponibles) des fongicides, des insecticides, des bactéricides, des éliciteurs et des nématicides (*ibid.*). Néanmoins, certains bioherbicides issus de micro-organismes sont commercialisés dans le monde, principalement aux États-Unis et au Canada (Cordeau *et al.*, 2016).

L'efficacité des agents microbiens de biocontrôle est variable en conditions réelles. Selon Bardin et Nicot (2020), les facteurs qui affectent l'efficacité des micro-organismes sont la variabilité des conditions environnementales, les pratiques agricoles, la qualité des produits et leur mode d'application (notamment la période de réactivation des produits après un stockage sous une forme désactivée), ainsi que les caractéristiques du bioagresseur ciblé.

Les biostimulants des plantes

Les biostimulants des plantes ne sont pas des produits de biocontrôle à proprement parler, mais, en facilitant le bon développement de la plante, ils renforcent indirectement sa résistance au stress biotique. Ils recouvrent une large catégorie de produits, y compris des micro-organismes (Yakhin *et al.*, 2017). Du Jardin (2015) définit les biostimulants végétaux comme « toute substance ou micro-organisme appliqué aux plantes dans le but d'améliorer l'efficacité nutritionnelle, la tolérance au stress abiotique ou les caractéristiques qualitatives de la culture, indépendamment de sa teneur en éléments nutritifs ». Les micro-organismes appliqués sur les plantes peuvent avoir une double fonction d'agent de biocontrôle et de biostimulant (*ibid.*).

Les biostimulants d'origine microbienne proviennent de bactéries, de levures et de champignons, ils peuvent inclure des micro-organismes vivants ou non, et leurs métabolites (Yakhin *et al.*, 2017). Les biostimulants ont divers impacts positifs sur les plantes : l'activation du métabolisme de l'azote ou la libération du phosphore des sols, la stimulation de l'activité microbienne du sol, la stimulation de la croissance des racines, l'amélioration de l'implantation des plantes, la stimulation de la croissance des plantes et l'atténuation des effets négatifs des stress abiotiques sur les plantes (*ibid.*). Le mode d'action des biostimulants n'est pas bien connu (*ibid.*).

La plupart des micro-organismes utilisés dans les parcelles entrent dans la catégorie des biostimulants des plantes. Les plus connus sont les champignons mycorhiziens arbusculaires ; ils établissent des symbioses avec les espèces végétales et améliorent leur efficacité dans l'absorption de nutriments et de l'eau, les protègent des stress biotiques et abiotiques et renforcent les interactions avec les communautés végétales (Jardin, 2015 ; Backer *et al.*, 2018). Les rhizobia figurent parmi les biostimulants les plus utilisés. Il s'agit de bactéries fixatrices d'azote qui forment des nodules racinaires dans les légumineuses permettant de fixer l'azote atmosphérique dont la plante bénéficie (Hendriksen, 2022).

Comme pour les biostimulants, les stimulateurs de défense des plantes ne contrôlent pas les bioagresseurs. Cependant, certains agents microbiens de biocontrôle induisent une résistance systémique des plantes à des bioagresseurs spécifiques

(Amichot *et al.*, 2022 ; Bardin et Nicot, 2020). En effet, les micro-organismes bénéfiques produisent différents composés (motifs moléculaires associés aux pathogènes ou aux micro-organismes) et des éliciteurs (molécules spécifiques déclenchant des réactions de défense de la part des cellules de la plante attaquée) qui sont reconnus par les plantes et induisent des mécanismes immunitaires conférant une résistance systématique à la plante (Pieterse *et al.*, 2014). Cette résistance implique un processus physique de la plante appelé *priming* (il s'agit d'une forme de mémoire immunologique des plantes) dans lequel la plante peut activer des défenses cellulaires fortes et rapides en cas d'invasion de ravageurs (Pieterse *et al.*, 2014 ; Conrath *et al.*, 2006).

L'utilisation de substances naturelles

Les substances naturelles sont issues des plantes, des animaux, des micro-organismes ou sont d'origine minérale. Leur mode d'action peut être direct en tant que produits de lutte biologique, ou indirect au travers de la stimulation des défenses des plantes (Amichot *et al.*, 2022).

Les biopesticides issus de plantes peuvent être préparés directement par les agriculteurs ou être des produits industriels commercialisés (Siegwart et Lavoit, 2020). Les biopesticides d'origine végétale sont divers : le pyrèthre, produit naturellement par les astéracées, est un neurotoxique pour les insectes ; les huiles végétales, comme l'huile de colza et l'huile de tournesol, ont un effet asphyxiant sur les insectes ; l'acide pélargonique est utilisé comme herbicide (*ibid.*).

La plupart de ces produits ont une faible persistance dans l'environnement et sont considérés comme des substances à faible risque (Siegwart et Lavoit, 2020). Néanmoins, la plupart d'entre eux étant non sélectifs, ils peuvent avoir un impact sur les insectes non ciblés, mais aussi au-delà (*ibid.*). Ainsi, la nicotine et la rétonine, issues de plantes, ont été retirées du marché en raison de leurs effets sur les mammifères et la santé humaine (Siegwart et Lavoit, 2020 ; Amichot *et al.*, 2022).

L'utilisation de médiateurs chimiques

Les médiateurs chimiques sont des molécules synthétiques identiques aux phéromones ou kairomones produites par les insectes (Amichot *et al.*, 2022). Celles-ci sont utilisées par les insectes pour communiquer entre eux et ont un rôle majeur sur leur comportement, par exemple sur leur alimentation, leur reproduction ou leurs relations sociales (Montagné *et al.*, 2020).

Les phéromones peuvent être utilisées pour (i) surveiller les populations de ravageurs, (ii) les piéger et les annihiler, et (iii) créer de la confusion sexuelle.

Lorsqu'elles sont employées pour surveiller les populations de ravageurs, des pièges contenant des phéromones synthétiques peuvent être utilisés pour attirer les insectes ravageurs, informant l'observateur de leur présence (Witzgall *et al.*, 2010).

Les phéromones sont également utilisées pour le piégeage de masse et l'annihilation d'insectes ravageurs, selon une stratégie appelée « attirer et tuer » (Anton et Jacquin-Joly, 2020). Les insectes sont massivement attirés dans un piège de grande capacité par un leurre chimique médiateur, puis tués (*ibid.*). Cette technique est mobilisée pour contrôler des populations d'insectes comme les coléoptères, les mouches ou les charançons (*ibid.*).

Enfin, la confusion sexuelle est une méthode efficace utilisant des phéromones (Lance *et al.*, 2016). Elle consiste à saturer l'air de phéromones d'attraction sexuelle des espèces afin d'empêcher les mâles de localiser les femelles, réduisant ainsi l'incidence des accouplements et donc la population d'insectes (*ibid.*). C'est la technique la plus utilisée parmi les médiateurs chimiques. Elle implique une organisation collective pour être mise en œuvre dans une zone étendue (Anton et Jacquin-Joly, 2020). Elle est employée sur des cultures à haute valeur ajoutée, car il s'agit d'une méthode coûteuse, par exemple dans les vignobles français et italiens contre les lépidoptères ravageurs (*ibid.*).

De manière générale, les médiateurs chimiques sont intéressants pour la protection des cultures, car « ils sont spécifiques aux espèces, ils sont actifs en très petites quantités et la grande majorité d'entre eux ne sont pas connus pour être toxiques pour les animaux » (Witzgall *et al.*, 2010).

■ La lutte physique

Le contrôle thermique

La lutte physique est un ensemble de pratiques qui utilisent des méthodes physiques pour la protection des plantes. Elle comprend le contrôle thermique, le contrôle électromagnétique, le contrôle pneumatique, le contrôle acoustique et les barrières physiques. Le désherbage mécanique fait également partie de la lutte physique, mais il sera développé dans la sous-section suivante, consacrée à la gestion temporelle par les pratiques culturales.

Le contrôle thermique consiste à provoquer des lésions internes chez les bioagresseurs par un chauffage léthal ou en abaissant la température en dessous du point de congélation (Aubertot *et al.*, 2005a). Il est utilisé contre les adventices avec le désherbage thermique qui consiste à provoquer un effet léthal en augmentant la température par un processus physique (Bauer *et al.*, 2020). Différentes techniques sont utilisées : les flammes, le courant électrique, les rayonnements infrarouges, l'eau chaude, la solarisation du sol, la vapeur surchauffée et la mousse chaude (Bauer *et al.*, 2020 ; Peerzada et Chauhan, 2018). Cependant, les températures élevées peuvent altérer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Peerzada et Chauhan, 2018). En ce qui concerne les insectes ravageurs et les pathogènes, la lutte thermique est mobilisée dans les conditions post-récolte, avec différentes techniques : le stockage réfrigéré pour la conservation des fruits et légumes, les traitements à l'air chaud, l'immersion dans l'eau chaude, les flammes, l'étuvage et le chauffage solaire (Vincent *et al.*, 2003).

La lutte pneumatique

La lutte pneumatique consiste à « utiliser de l'air en mouvement [aspiration, soufflage ou une combinaison des deux] pour éliminer les insectes indésirables des cultures » (Khelifi *et al.*, 2001). La lutte pneumatique n'est pas spécifique et a des effets négatifs sur les organismes auxiliaires (Vincent *et al.*, 2003). La lutte acoustique consiste à utiliser le bruit pour éloigner les bioagresseurs. Des effaroucheurs d'oiseaux peuvent être utilisés pour effrayer les oiseaux par le son (Laget *et al.*, 2015).

Les barrières physiques

Enfin, les barrières physiques visent à empêcher l'arrivée des ravageurs en entourant ou en obstruant leur passage vers la culture. Il existe différents types de barrières physiques, comme les tranchées, les barrières ou le paillage du sol (Vincent *et al.*, 2003). Les brise-vent naturels (tels que les arbres ou les haies) agissent comme des barrières physiques. En modifiant la circulation de l'air, ils influencent la dispersion des insectes dans le paysage (Ratnadass *et al.*, 2012). Les barrières physiques sont particulièrement utilisées à l'intérieur des serres (van Lenteren, 2000), mais également pour les cultures de plein champ, par exemple sous forme de film plastique pour les pommes de terre, de paillages, de filets ou de bâches en plastique contre les pucerons (Aubertot *et al.*, 2005a). Les barrières physiques ont également été développées pour la production fruitière : filet de protection, grille de protection des troncs, paillage (bâche plastique, toile tissée ou plantes de paillage ; Laget *et al.*, 2015). Néanmoins, ces barrières qui sont pour la plupart en plastique contribuent largement aux déchets plastiques de l'agriculture (Briassoulis *et al.*, 2013). Ceux-ci ont un impact négatif sur l'environnement, la santé humaine et l'économie régionale (*ibid.*).

■ La gestion temporelle par les pratiques culturales

Les pratiques culturales peuvent être adaptées pour prévenir et limiter l'apparition d'insectes ravageurs, de maladies et d'adventices (Bajwa *et al.*, 2004). Nombre de ces pratiques culturales doivent être réfléchies dans le temps et sont imbriquées dans la gestion temporelle du système de culture. Elles comprennent des pratiques qui modifient l'état de l'agroécosystème pour défavoriser les bioagresseurs et favoriser leurs ennemis naturels, ou des mécanismes physiques qui limitent le développement des bioagresseurs (*ibid.*). Dans la gestion temporelle par les pratiques culturales, nous incluons les éléments suivants : le calendrier cultural (dates de semis et de récolte, densité des semis), la fertilisation et l'irrigation, la gestion des différents couverts et des résidus, la conduite architecturale des arbres, le travail du sol et le désherbage mécanique, ainsi que la diversification temporelle (succession des cultures et cultures intermédiaires).

Le calendrier cultural

L'adaptation du calendrier cultural, de la date et de la densité des semis ainsi que de la date de récolte peut limiter le développement des populations de bioagresseurs et leurs dégâts sur les cultures (Aubertot *et al.*, 2005a).

La date de semis et la densité de semis

La date de semis peut être adaptée pour désynchroniser le développement des bioagresseurs et les périodes de sensibilité de la culture (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011).

Jouer sur la date de semis, combiné à une stratégie de faux semis, est un des leviers majeurs pour éviter le développement d'adventices (Munier-Jolain, 2018). La date de semis affecte également le niveau de dommages causés par les insectes ravageurs et la capacité de la plante à compenser ces dommages (Rusch *et al.*, 2010). Pour certaines plantes, comme le maïs ou le riz, un semis précoce réduit les dommages causés par les insectes et les vers ; tandis que pour d'autres, comme le soja ou le blé, un semis tardif est préférable (Bajwa et Kogan, 2004). Enfin, la date de semis peut être ajustée pour lutter contre les maladies en désynchronisant la période de dispersion des maladies et la période de sensibilité des cultures (Aubertot *et al.*, 2005b ; Bousset, 2020). Néanmoins, d'autres contraintes déterminent la date de semis. Un semis tardif de cultures d'hiver limitera le temps de croissance, tandis que pour les cultures de printemps, un semis tardif déplacera le cycle de croissance vers une période de stress hydrique (Aubertot *et al.*, 2005b).

La densité des semis et la largeur de l'inter-rang sont aussi des leviers pour diminuer la pression des bioagresseurs. En effet, le couvert végétatif forme un microclimat qui dépend de la densité du semis et de l'apport en eau et en azote. Un semis dense avec un apport important en azote et en eau risque d'entraîner un microclimat favorable à la propagation des maladies fongiques et des maladies telluriques (Aubertot *et al.*, 2005b). À l'inverse, une densité de semis élevée permet de renforcer le contrôle des adventices (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011). De plus, lors du semis, la largeur de l'inter-rang est à envisager en cohérence avec l'utilisation future d'outils de dés-herbage mécanique adaptés (bineuse, sarcluse, herse ; chapitre 2, section 1, p. 56 ; Aubertot *et al.*, 2005b).

La date de récolte

L'ajustement de la date de récolte est aussi un facteur de réduction de la population de bioagresseurs. En général, une récolte précoce diminue les dommages causés par les insectes ravageurs (Bajwa et Kogan, 2004). La date de récolte peut également influencer la banque de semences d'adventices dans le sol (Aubertot *et al.*, 2005b).

La fertilisation et l'irrigation

Comme vu plus haut, une forte disponibilité en azote et en eau pendant la phase végétative favorise un microclimat propice au développement des pathogènes

(Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011). Ainsi, la réduction des niveaux d'azote et d'eau peut diminuer le niveau de maladies des cultures.

Pour les insectes ravageurs herbivores, dans la majorité des cas, un niveau élevé de fertilisation favorise les attaques d'insectes ravageurs (Rusch *et al.*, 2016a). En effet, les plantes vigoureuses sous l'effet de la fertilisation et de l'irrigation sont davantage attaquées par les insectes herbivores parce qu'elles fournissent une nourriture de meilleure qualité.

Pour les adventices, l'apport d'azote peut favoriser les espèces nitrophiles. Ainsi, en fonction de l'espèce cultivée et des caractéristiques des adventices, le niveau de fertilisation azotée peut favoriser soit les cultures, soit les adventices (Munier-Jolain, 2018). L'irrigation peut également favoriser le développement d'adventices hygrophiles pendant l'été (Aubertot *et al.*, 2005b).

En conclusion, les principes de la lutte intégrée contre les bioagresseurs suggèrent une utilisation équilibrée de la fertilisation et de l'irrigation afin de prévenir l'arrivée des bioagresseurs (Barzman *et al.*, 2015). En outre, l'usage à long terme d'une fertilisation azotée minérale altère la diversité et la composition des communautés microbiennes du sol (Beltran-Garcia *et al.*, 2021), ce qui affecte les services symbiotiques microbiens pour les cultures, tels que l'assimilation des nutriments et la protection contre les stress biotiques et abiotiques (*ibid.*).

Comparés à la fertilisation minérale, les engrais organiques basés sur les effluents d'élevage (ou les lombrics) améliorent la défense des cultures, ralentissent l'absorption des macronutriments qui réduisent la croissance des arthropodes ravageurs et favorisent les ennemis naturels des ravageurs en augmentant les habitats sol-surface et les proies alternatives (Rowen *et al.*, 2019). Néanmoins, les effluents d'élevage peuvent être une source de pollution, en particulier dans les régions où l'élevage est fortement concentré (Roguet *et al.*, 2015). L'engrais vert, c'est-à-dire « une culture utilisée principalement comme amendement du sol et comme source de nutriments pour les cultures suivantes », peut également permettre de lutter contre les bioagresseurs (Cherr *et al.*, 2006), en diminuant la population d'adventices, en perturbant le cycle de vie des nématodes, ou encore en fournissant des habitats aux ennemis naturels des bioagresseurs (*ibid.*).

La gestion des couverts et des résidus des cultures

La gestion des différentes couvertures des sols (enherbement, cultures de couverture, résidus de cultures ou litière) a un impact sur les bioagresseurs.

Tout d'abord, les résidus de cultures en surface défavorisent la germination et la croissance des adventices, en particulier des adventices à petites graines, en abaissant la température du sol, en limitant la disponibilité de la lumière, en créant des obstacles physiques à la croissance et en exerçant des effets allélopathiques potentiels (Nichols *et al.*, 2015).

En revanche, concernant les maladies, les résidus de culture peuvent accueillir l'inoculum de pathogènes, en particulier de maladies telluriques (Aubertot *et al.*, 2005b). Aussi, l'enfouissement des résidus par le travail du sol peut réduire la dispersion des spores vers d'autres parcelles ainsi que vers les cultures suivantes (*ibid.*). De même, la destruction des résidus de culture par le travail du sol peut diminuer les populations des insectes ravageurs du sol, en perturbant leur cycle de vie (Bajwa et Kogan, 2004). Les couverts semés entre deux cultures principales peuvent également jouer un rôle de compétition vis-à-vis des adventices, notamment en agriculture de conservation (chapitre 2, section 1, p. 56 ; Chauvel *et al.*, 2018).

Pour les cultures pérennes, l'enherbement et la flore sauvage peuvent apporter des services, notamment pour la lutte contre les ravageurs (Metay *et al.*, 2018), en favorisant les populations d'ennemis naturels des bioagresseurs, en améliorant l'infiltration de l'eau – limitant ainsi le développement des champignons –, et en assurant un contrôle de la vigueur de la plante pérenne, ce qui limite la pression des pathogènes (Barbier *et al.*, 2011). Cependant, afin de ne pas défavoriser le développement de la culture, il est nécessaire de contrôler cette couverture par un désherbage mécanique, une couverture semée, un paillage, un désherbage thermique ou une destruction partielle par broyage, fauchage, roulage ou pâturage animal (Barbier *et al.*, 2011 ; Laget *et al.*, 2015 ; Metay *et al.*, 2018).

La conduite architecturale des arbres

Pour les cultures pérennes, l'architecture des arbres joue un rôle dans la lutte contre les bioagresseurs. La gestion de l'architecture de l'arbre dans le temps modifie le microclimat, les mouvements des bioagresseurs (distance inter-organes) et la vigueur de la plante, ce qui influence le développement des bioagresseurs (Laget *et al.*, 2015 ; Barbier *et al.*, 2011). Les tailles de formation qui influencent l'architecture de l'arbre pendant les premiers stades de croissance peuvent également supprimer les organes affectés par les attaques de bioagresseurs (Laget *et al.*, 2015). Ainsi, les travaux sur la vigne, tels que la taille, le rognage, l'ébourgeonnage, l'effeuillage et l'éclaircissement, permettent une bonne circulation de l'air et un séchage rapide des feuilles après la pluie, ce qui diminue le développement des maladies cryptogamiques (Barbier *et al.*, 2011).

Le travail du sol et le désherbage mécanique

Le travail du sol est défini par le portail de la FAO comme « la modification des conditions du sol pour la production de cultures ; la manipulation mécanique du sol à quelque fin que ce soit ». Cette technique est largement utilisée pour lutter contre les adventices (Colbach et Vacher, 2014), notamment pour réduire la banque de semences, et aussi pour le désherbage mécanique, défini par le portail de la FAO comme « l'élimination de la végétation indésirable par des moyens mécaniques ». Le travail du sol a également un impact sur les insectes ravageurs et les agents pathogènes (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011).

Le labour implique une inversion des horizons du sol, il détruit les plantes en surface et enfouit les graines d'adventices dans les horizons profonds où elles ne peuvent pas germer (Munier-Jolain, 2018). Il s'agit d'un levier majeur pour gérer le stock semencier d'adventices (*ibid.*). Il permet aussi de contrôler des pathogènes du sol, en enfouissant l'inoculum dans ses couches profondes (Aubertot *et al.*, 2005b). Le labour favorise également la lutte contre les insectes ravageurs, en les perturbant ou en les détruisant aux premiers stades de leur vie, et la lutte contre les maladies par enfouissement des résidus (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011). Néanmoins, il a des effets négatifs sur la santé du sol (Carr, 2017).

Ensuite, la technique du faux semis consiste en un travail du sol peu profond qui favorise la germination des adventices et les détruit avant le semis de la culture, réduisant ainsi le stock de graines d'adventices qui pourraient potentiellement émerger dans le champ (Labreuche *et al.*, 2020). Cette opération peut être répétée plusieurs fois, peu avant le semis (Rodriguez, 2018a).

Enfin, le désherbage mécanique détruit les adventices une fois levées, au moyen de différents outils : la herse étrille, la houe rotative ou encore la bineuse à doigts pour travailler dans l'inter-rang (Rodriguez, 2018b). Le désherbage mécanique est mobilisé dès le semis et différents actes techniques peuvent se compléter (*ibid.*). Comme déjà mentionné, le labour fait également office de désherbage mécanique en détruisant les adventices (Munier-Jolain, 2018).

Néanmoins, le travail du sol, en particulier le labour, rencontre des limites. Le labour compromet la qualité et la santé des sols et augmente le risque d'érosion hydrique et éolienne (Carr, 2017 ; Vincent-Caboud *et al.*, 2019). En effet, cette technique, par l'inversion continue des horizons, entraîne une dégradation de la structure du sol et son compactage, accélère la minéralisation de la matière organique et libère le carbone organique du sol (Holland, 2004). Le travail du sol perturbe la faune de celui-ci, a un impact important sur les communautés biologiques du sol, modifie la qualité de l'habitat, supprime les microhabitats pour la reproduction, et diminue la disponibilité des proies, ce qui affecte les populations d'ennemis naturels (Rusch *et al.*, 2010). Enfin, le labour nécessite un temps de travail important et a un coût élevé en matériel et en carburant (Aubertot *et al.*, 2005a).

Différentes méthodes pour réduire le labour et le travail du sol ont été développées : le labour profond sans inversion des horizons, le travail du sol superficiel, le travail du sol en bandes, les techniques sans labour basées sur l'usage de paillis (*mulch*) ou de couverts permanents.

On peut noter en particulier le mouvement d'agriculture de conservation du sol qui s'est d'abord développée en Amérique du Nord et du Sud. C'est un ensemble de techniques impliquant une réduction du travail du sol. Selon la FAO, elle se caractérise par trois principes : « une perturbation mécanique minimale du sol, une couverture organique permanente du sol et une diversification des espèces cultivées en

séquences ou en associations ». Cependant, les systèmes d'agriculture de conservation sont critiqués parce qu'ils accroissent la dépendance des systèmes de culture aux herbicides (Vincent-Caboud, 2019). Pour autant, certaines techniques existent pour se passer d'herbicides comme les techniques de non-labour basées sur l'utilisation de paillis (*ibid.*).

La diversification temporelle des cultures

La diversification temporelle des cultures regroupe (i) la succession des cultures ou la rotation des cultures, c'est-à-dire « l'organisation de la succession culturale des espèces sur une parcelle donnée » (Bézat *et al.*, 2022) et (ii) la mise en place de cultures intermédiaires, c'est-à-dire de « culture[s] implantée[s] entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante pendant une période plus ou moins longue appelée interculture » (Sudres *et al.*, 2022). La diversification temporelle des cultures permet une régulation de nombreux bioagresseurs : des adventices, des insectes aériens à l'échelle du paysage, des insectes telluriques, des pathogènes aériens lorsque l'inoculum est local, des pathogènes telluriques et des nématodes (Tibi *et al.*, 2022).

La succession des cultures

Une succession de cultures diversifiée permet de rompre le cycle de vie des bioagresseurs et ainsi d'éviter l'installation des populations de bioagresseurs les mieux adaptées à la culture (Barzman *et al.*, 2015).

La rotation des cultures est l'un des leviers les plus efficaces et les plus utilisés pour gérer les adventices (Nichols *et al.*, 2015). Chaque type de cultures de la succession génère des contraintes biotiques et abiotiques différentes sur la population d'adventices, en favorisant certaines et en défavorisant d'autres, faisant varier la pression de sélection sur les adventices à chaque changement de culture en fonction de la modification de la gestion culturale, de la variation de la compétition pour les ressources (eau, lumière et nutriments) et des propriétés allélopathiques¹¹ des plantes cultivées avec des cultures qui, par exemple, bloquent la germination des adventices (*ibid.*). Ainsi, l'insertion des prairies temporaires dans la rotation permet de maîtriser certaines adventices problématiques en grandes cultures, notamment le ray-grass (Munier-Jolain *et al.*, 2012 ; Doole et Pannell, 2008).

Concernant les maladies, une rotation culturale avec des cultures non-hôtes permet de rompre le cycle biologique de l'agent pathogène et ainsi d'éviter la maladie ; cette stratégie est particulièrement efficace pour les maladies telluriques (Ratnadass *et al.*, 2012).

Concernant les ravageurs, la succession de cultures différentes rompt le cycle biologique et reproductif des ravageurs en modifiant l'environnement aérien et souterrain,

11. L'allélopathie peut être définie comme « l'ensemble des interactions biochimiques directes ou indirectes, positives ou négatives, d'une plante sur l'autre » (Petit et Cordeau, 2020).

ce qui perturbe les ravageurs installés pendant la culture précédente (Bajwa et Kogan, 2004). La succession des cultures est particulièrement efficace contre les ravageurs telluriques qui hibernent dans le sol (*ibid.*). De plus, la diversification de la succession culturale favorise la biodiversité (Jusqu'à 37 % de biodiversité supplémentaire selon Beillouin *et al.*, 2021) et la diversité microbienne du sol (Venter *et al.*, 2016), étant ainsi bénéfique à la présence d'ennemis naturels des bioagresseurs (Rusch, 2020), ce qui améliore la lutte biologique par conservation.

Enfin, une succession culturale diversifiée participe à une fertilité des sols équilibrée et à une meilleure nutrition des plantes cultivées, ce qui améliore la résistance des cultures aux ravageurs et aux maladies (Ratnadass *et al.*, 2012).

Les cultures intermédiaires

Différents termes existent dans la littérature pour désigner une culture semée entre deux cultures de rente ; en français, nous pouvons utiliser l'expression *culture intermédiaire* (Sudres *et al.*, 2022). Cependant, en fonction de la finalité de la culture intermédiaire, d'autres termes sont mobilisés tels que *culture intermédiaire piège à nitrate*, *engrais vert* ou *culture de couverture* (Justes *et al.*, 2013). L'implantation de cultures intermédiaires est une pratique bénéfique pour la gestion des bioagresseurs (Beillouin *et al.*, 2021).

Tout d'abord, elles modifient le milieu et l'accès aux différentes ressources en permettant un meilleur contrôle des adventices (Justes *et al.*, 2013). En effet, les cultures intermédiaires sont en compétition avec les adventices pour leurs ressources, telles que la lumière, l'eau et les nutriments, au sein d'une même niche spatio-temporelle (*ibid.* ; Petit *et al.*, 2018). Les facteurs de cette compétition sont les traits phénotypiques de la plante tels que sa hauteur et sa surface ou l'angle des feuilles pour la lumière, la rapidité d'installation, la durée de végétation et la persistance de la biomasse sous forme vivante ou morte (Petit *et al.*, 2018). La couverture du sol des cultures intermédiaires diminue aussi la projection des spores, freine la dissémination des agents pathogènes et perturbe leur cycle (Justes *et al.*, 2013).

De plus, les cultures intermédiaires ont de nombreuses propriétés allélopathiques contre tous les types de bioagresseurs. Certaines plantes ou tissus morts produisent des substances chimiques toxiques pour les adventices, les agents pathogènes et les ravageurs (Jabran *et al.*, 2015 ; Albuquerque *et al.*, 2011 ; Ait-Kaci Ahmed *et al.*, 2020 ; Justes et Richard, 2017). Par exemple, la biofumigation est une méthode utilisée contre les maladies telluriques, les insectes et les nématodes (Justes et Richard, 2017 ; Ait-Kaci Ahmed *et al.*, 2020). Elle consiste à planter une culture intermédiaire possédant des propriétés allélopathiques (comme les brassicacées), à la broyer et à l'enfouir (Ait-Kaci Ahmed *et al.*, 2020). Pour les ravageurs, les cultures intermédiaires ont aussi des propriétés allélopathiques de répulsion et de piégeage (Justes et Richard, 2017).

En outre, la présence de cultures intermédiaires favorise la présence d'ennemis naturels et la santé des sols. En effet, l'existence de végétaux tout au long de l'année permet de favoriser l'abondance des carabes et leur prédation sur les graines d'adventices (Jabran *et al.*, 2015), l'implantation d'ennemis naturels des ravageurs (Singhal *et al.*, 2020) et la stimulation des ennemis naturels des bioagresseurs au sein du microbiote du sol (Justes *et al.*, 2013). Elles améliorent aussi la teneur en carbone organique et en azote du sol et stimulent la vie microbienne du sol (McDaniel *et al.*, 2014), ce qui est susceptible d'accroître la résistance des plantes.

Enfin, afin d'éviter que les cultures intermédiaires n'entrent en compétition avec les cultures de rente, la question se pose de la destruction du couvert. Il est possible de mettre en place des cultures intermédiaires avec des plantes gélives qui seront détruites par le gel pendant l'hiver, ou bien de détruire mécaniquement le couvert (labour, fauche, rouleau crêpeur, sape des racines ; Petit *et al.*, 2018).

■ La gestion spatiale de la diversité intraparcélaire des cultures

Introduction et définitions

La diversification spatiale des cultures peut se faire au niveau (i) des gènes (population), (ii) des variétés (mélanges variétaux, population) et (iii) des espèces (cultures associées, polyculture) (Finckh et Wolfe, 2006).

La diversification génétique et variétale consiste à cultiver soit des mélanges de variétés pures, soit des « populations » ayant une forte hétérogénéité génétique comme les variétés anciennes, les populations croisées composites et les populations en pollinisation libre (Finckh, 2008 ; Goldringer *et al.*, 2017).

La diversification des espèces peut se faire soit en associant des cultures annuelles entre elles dans un même champ, ce que l'on appelle les cultures associées ; soit en associant des cultures annuelles et des cultures pérennes ou encore des cultures pérennes entre elles, ce que l'on appelle l'agroforesterie (Malézieux *et al.*, 2009).

Les mélanges variétaux et les cultures associées peuvent être implantés selon différentes distributions spatiales : soit en étant cultivés de manière intercalée ce qui permet de maximiser les interactions entre espèces ou entre variétés, soit en rangs alternés diminuant les interactions, soit en bandes assez larges pour une gestion indépendante mais permettant certaines interactions, ou en blocs ou en patches avec de faibles interactions (Finckh et Wolfe, 2006). Il existe aussi des cultures en relais où deux cultures ou plus sont cultivées ensemble pendant une partie seulement de leur cycle de croissance (*ibid.*).

Le tableau 2.2, issu d'une expertise sur les effets de la diversification des cultures, synthétise les connaissances scientifiques existantes concernant les effets de la diversification intraparcélaire sur la régulation des bioagresseurs (Tibi *et al.*, 2023).

Tableau 2.2. Effet des différents modes de diversification intraparcellaire sur la régulation des types de bioagresseurs, selon la littérature scientifique

	Adventices	Insectes aériens	Insectes telluriques	Maladies vectorielles	Pathogènes aériens	Pathogènes telluriques	Nématodes
Mélanges variétaux	Effet attendu positif	Effet positif	?	Effet positif faible	Effet positif à amplitude variable	Effet faible	?
Cultures associées	Effet positif	Effet positif fort	Effet positif	?	Effet positif fort	Effet positif à amplitude variable	
Agroforesterie	Effet positif assez fort	Effet positif à amplitude variable	?	?	Absence de consensus dans la littérature	?	Effet positif

Un effet positif signifie que le mode d'action permet une régulation du bioagresseur. Un effet attendu signifie qu'il existe des hypothèses théoriques sur l'existence d'un effet sur la régulation du bioagresseur. Un point d'interrogation signifie qu'il n'y a pas assez d'informations dans la littérature pour conclure.

Source : adapté de Tibi *et al.*, 2022.

La diversification intraspécifique : mélanges variétaux et variétés populations

Historiquement, avant le xx^e siècle, les cultures étaient cultivées en « population », elles étaient composées de multiples génotypes, multipliées en pollinisation libre au champ et maintenues par les agriculteurs (Dawson et Goldringer, 2011). Ces variétés-populations pouvaient évoluer et s'adapter localement à différentes contraintes environnementales (*ibid.*). Au xx^e siècle, avec le travail des sélectionneurs, les variétés pures sont devenues dominantes dans les pays industrialisés comme en Europe (*ibid.*), entraînant une réduction de la biodiversité cultivée et, par conséquent, une augmentation de la vulnérabilité des systèmes de culture (Tooker et Franck, 2012).

Plusieurs avantages agronomiques sont cependant liés à ces variétés hétérogènes : rendements plus stables, résilience accrue au cours du temps face aux variations climatiques interannuelles (Wolfe *et al.*, 2008) et maintien d'une diversité des résistances aux pathogènes (Finckh *et al.*, 2000).

Un mélange variétal peut être défini comme « une pratique agricole qui consiste à semer un mélange hétérogène de variétés d'une même espèce au sein d'une même parcelle » (Anchordoquy *et al.*, 2022). Afin de retrouver de la diversité génétique, notamment pour conférer une meilleure résistance des cultures aux différents bioagresseurs, les mélanges variétaux se sont développés (Dawson et Goldringer, 2011 ; Grettenberger et Tooker, 2015).

Pour la protection contre les maladies

Les mélanges variétaux peuvent fortement diminuer la présence et le développement de maladies. Par exemple, dans leur méta-analyse, Huang *et al.* (2012) observent que dans 83 % des mélanges variétaux étudiés contre la rouille du blé, le niveau moyen de maladie était plus bas dans les mélanges variétaux que dans les peuplements purs, avec une réduction de la rouille du blé de 30 % à 50 %. Plusieurs mécanismes et effets sont en jeu pour réduire la présence et l'impact des maladies sur les mélanges variétaux (Litrico *et al.*, 2015 ; Borg *et al.*, 2018) :

- L'effet de dilution. La diminution de la densité de plantes sensibles à un pathogène dans un mélange diminue la propagation et la sévérité de la maladie (Litrico *et al.*, 2015).
- L'effet barrière. La présence de variétés résistantes au pathogène parmi les variétés sensibles agit comme une barrière physique contre la dispersion des spores de pathogènes virulents (Finckh *et al.*, 2000 ; Borg *et al.*, 2018).
- L'effet de prémunition. Dans un mélange variétal, une plus large diversité de souches pathogènes se développent par rapport à une culture monovariétale. La présence d'une souche non virulente pour une variété déclenche des mécanismes de défense qui lui permettront d'être protégée de futures attaques de souches virulentes (Litrico *et al.*, 2015).
- L'effet de disruption sélective. Dans un mélange variétal, un pathogène est confronté à différentes résistances, ce qui va réduire la vitesse d'adaptation du pathogène à la plante hôte et sa virulence (Litrico *et al.*, 2015 ; Borg *et al.*, 2018).
- L'effet de compensation. Dans un mélange, les variétés sensibles ont un rendement plus faible, laissant la place pour la croissance des variétés résistantes qui compenseront la perte de rendement (*ibid.*).

L'échelle de la diversification est aussi à prendre en compte (Finckh, 2008) : l'augmentation des surfaces en mélanges pourrait permettre de diminuer la sévérité de la maladie mais aussi sa dispersion régionale.

Pour la gestion des adventices et des ravageurs

Pour la gestion des ravageurs, plusieurs mécanismes semblent être impliqués par les mélanges variétaux : la dilution des ressources ainsi que les effets sur la chaîne trophique et les ennemis naturels (Snyder *et al.*, 2020). Pour la dilution des ressources, des différences de précocité ou d'appétence entre les variétés peuvent avoir un effet sur les insectes ravageurs (atelier d'experts, novembre 2020). De plus, la diversité génétique d'un peuplement végétal favorise l'abondance et la diversité des arthropodes et particulièrement des ennemis naturels des ravageurs (Koricheva et Hayes, 2018).

Concernant les adventices, l'implantation de mélanges variétaux améliorerait la compétitivité de la culture vis-à-vis de celles-ci (Oveisi *et al.*, 2021). Du fait de l'hétérogénéité de l'architecture et de la phénologie des plantes, les mélanges variétaux augmenteraient l'interception de la lumière (en jouant sur les différences de taille

des plantes), améliorant la compétitivité de la culture vis-à-vis des adventices (*ibid.* ; Lammerts van Bueren *et al.*, 2002).

Les mélanges variétaux sont utilisés par les agriculteurs pour réguler les maladies en assemblant des variétés dont les résistances ou les tolérances aux bioagresseurs sont complémentaires, créant ainsi un couvert dont le niveau de résistance « moyen » est adapté au complexe pathogène local (Barot *et al.*, 2017). Cependant, les variétés commerciales développées jusqu'à maintenant ont été sélectionnées pour leur capacité à produire en culture pure, sans que leur comportement en mélange n'ait été pris en compte (Dawson et Goldringer, 2011). De nouvelles stratégies de sélection sont à envisager pour répondre aux besoins de diversification, ce point est développé dans le chapitre 2, section 1, p. 72-74.

La diversification interspécifique : cultures associées et agroforesterie

Les cultures associées

Les cultures associées (*intercropping* en anglais) sont « une pratique agricole qui consiste à planter dans une parcelle au moins deux espèces pendant une période significative de leur croissance » (Bedoussac et Journet, 2022).

Selon la méta-analyse de Beillouin *et al.* (2021), les cultures en association présentent des niveaux de contrôle des maladies et des ravageurs plus élevés (+66 %) que les cultures simples. Selon la méta-analyse de Verret *et al.* (2017), la présence de plantes compagnes en association diminue la biomasse des adventices de 56 %. De même, pour Tibi *et al.* (2023), les cultures associées ont un effet positif sur la régulation des adventices, des insectes et des pathogènes telluriques, et un effet fort sur la régulation des insectes et des pathogènes aériens. Ces différents points sont détaillés ci-dessous.

Pour la gestion des adventices

Les cultures associées participent à la gestion des adventices en étant en compétition pour les ressources comme l'eau, la lumière et les nutriments (Petit *et al.*, 2018). L'augmentation du couvert végétal dans les cultures associées augmente ainsi la compétitivité des plantes cultivées (*ibid.*). Plusieurs expérimentations ont montré que l'association entre des légumineuses et un colza ou un blé permet de réduire significativement la présence d'aventices comparée à la culture seule (Morison *et al.*, 2014).

La diversification inter-espèce peut aussi se faire à travers la mise en place de bandes enherbées en bordure de parcelles. Celle-ci permet de limiter le développement d'aventices dans les parcelles cultivées, d'autant plus si la bande enherbée est fauchée et broyée avant grenaison (Petit et Cordeau, 2020). En constituant un lieu d'hibernation pour les carabes, elles favorisent aussi l'intensité de leur prédation sur les graines d'aventices (*ibid.*).

Pour la gestion des insectes ravageurs

Les cultures associées permettent une meilleure gestion des insectes ravageurs grâce à plusieurs leviers et techniques.

Tout d'abord, l'association de cultures différentes rend la localisation des cultures plus difficile pour les insectes ravageurs en complexifiant le milieu (complexité des stimuli olfactifs et visuels) et en créant des barrières physiques (Therond *et al.*, 2017).

De plus, des cultures pièges (*trap crops* en anglais) peuvent être associées à des cultures de rente. Ce sont des peuplements végétaux qui, en soi ou par manipulation, sont déployés pour attirer, détourner, intercepter ou retenir les insectes ciblés ou les agents pathogènes qu'ils véhiculent (Ratnadass *et al.*, 2012).

Par ailleurs, le *push-pull* est une technique qui combine les plantes répulsives (effet *push*) et les plantes pièges (effet *pull*). Les plantes répulsives repoussent les insectes ravageurs de l'intérieur de la parcelle grâce à des composés sémiochimiques, et les plantes pièges les attirent sur le bord de la parcelle (Anton et Jacquin-Joly, 2020).

Certaines plantes, pouvant être cultivées en association, ont un effet allélopathique et produisent des composants toxiques vis-à-vis des nématodes, par exsudation des racines (Ratnadass *et al.*, 2012).

De plus, les cultures associées et les bandes fleuries augmentent la présence d'ennemis naturels des insectes ravageurs (Letourneau *et al.*, 2011), ce qui favorise le contrôle biologique des ravageurs des cultures (Rusch, 2020).

Enfin, l'association d'une culture avec une légumineuse permet une complémentarité entre les deux espèces et l'amélioration de la nutrition de la culture associée (Duchene *et al.*, 2017). Cette association bénéficie aussi à la vie biologique du sol (*ibid.*). Ces deux facteurs augmentent la productivité et la résistance de la plante aux ravageurs (*ibid.* ; Ratnadass *et al.*, 2012).

Pour la gestion des pathogènes

Ratnadass *et al.* (2012) recensent plusieurs effets des cultures associées sur les pathogènes au travers du changement de microclimat lié au couvert végétal des cultures associées, d'effets d'allélopathie des plantes cultivées sur les pathogènes, de la réduction des insectes ravageurs vecteurs de pathogènes, de la stimulation d'antagonistes dans le sol (le couvert diversifié permet de développer une diversité de micro-organismes dans celui-ci), de l'effet barrière d'une culture associée en fonction de son arrangement spatial, de la perturbation du cycle du pathogène grâce à la présence de plantes non-hôtes ainsi que de l'amélioration de la nutrition de la plante qui renforce sa résistance aux maladies.

L'effet des cultures associées pour réguler les bioagresseurs est largement démontré. Néanmoins, la mobilisation de certains mécanismes est encore en cours de développement en Europe, comme l'allélopathie ou le développement de systèmes *push-pull*. De plus, les cultures implantées en association peuvent entrer en concurrence. Ainsi, la diversification par les cultures associées demande une réflexion sur le choix des cultures associées, et nécessite aussi de développer des programmes de sélection orientés vers la diversification interspécifique (Enjalbert *et al.*, 2019 ; Jacquet *et al.*, 2022). Ce point est détaillé dans le chapitre 2, section 1, p. 72-73.

L'agroforesterie

Selon la FAO, l'agroforesterie désigne « des systèmes et des technologies d'utilisation des terres dans lesquels des plantes ligneuses pérennes (arbres, buissons, palmiers, bambous, etc.) sont délibérément utilisées dans la même unité de gestion que des cultures agricoles et/ou des animaux, sous différentes formes d'organisation spatiale ou temporelle ». L'agroforesterie regroupe une grande diversité de systèmes : parcelles sylvo-arables (par exemple, grandes cultures sous peupliers ou noyers, prés-vergers), espaces sylvopastoraux (par exemple, prés-bois, forêts pâturées), cultures étagées, parcelles agricoles bordées d'alignements d'arbres, de haies ou de ripisylves, bocages, cultures d'abattis-brûlis, taillis à courte rotation (Vigan *et al.*, 2022). En Europe, l'agroforesterie concerne principalement les systèmes sylvopastoraux et les systèmes sylvo-arables (Mosquera-Losada *et al.*, 2009).

Plusieurs méta-analyses montrent que les systèmes agroforestiers permettent une meilleure gestion des bioagresseurs (Pumariño *et al.*, 2015 ; Beillouin *et al.*, 2021). Néanmoins, les études compilées dans ces méta-analyses ont été principalement réalisées en milieu tropical (Beillouin *et al.*, 2021). Les systèmes agroforestiers permettent une forte régulation des adventices, une régulation variable des insectes aériens selon les plantes cultivées et les traits de vie des insectes, et une régulation potentielle des pathogènes aériens (Tibi *et al.*, 2023).

La présence d'arbres dans une parcelle agricole modifie le microclimat et l'ombrage, ce qui impacte le développement des adventices, des ravageurs et des maladies (Pumariño *et al.*, 2015 ; Ratnadass *et al.*, 2012). Les systèmes agroforestiers améliorent la nutrition des cultures et leur compétitivité vis-à-vis des adventices (Pumariño *et al.*, 2015). Les arbres font aussi office de barrières contre l'intrusion de ravageurs dans la parcelle (Ratnadass *et al.*, 2012). Enfin, les arbres des systèmes agroforestiers devraient favoriser la présence d'ennemis naturels des ravageurs en leur procurant un espace de refuge et de nidification (Pumariño *et al.*, 2015 ; Ratnadass *et al.*, 2012).

■ La gestion des paysages

La gestion spatiale et temporelle du paysage est un moyen de lutte contre les bioagresseurs, mais qui reste peu développé. Dans cette sous-section, nous envisageons une gestion au-delà du champ cultivé, en considérant les habitats semi-naturels (espaces non cultivés), la mosaïque des cultures et les systèmes d'exploitation.

Le contexte paysager a été largement étudié pour la lutte contre les arthropodes nuisibles, notamment au travers du renforcement des populations d'ennemis naturels qui se développent et se dispersent au-delà de la parcelle, à l'échelle du paysage (Rusch *et al.*, 2016b). Cela consiste à mettre en œuvre les principes de la lutte biologique par conservation qui est « basée sur la reconnaissance du fait que les populations de ravageurs peuvent être maintenues sous contrôle par l'action d'autres organismes vivants bénéfiques (par opposition aux organismes qui endommagent les cultures) qui sont des ennemis naturels du ravageur » (*ibid.*).

Le paysage peut être décrit en fonction de sa complexité. Dans la littérature scientifique sur l'écologie des paysages, la complexité du paysage est caractérisée par la composition des types d'habitats et l'arrangement spatial de ces habitats, c'est-à-dire sa configuration (Estrada-Carmona *et al.*, 2022). Les paysages complexes favorisent la biodiversité ; ils ont un effet positif fort et significatif sur la diversité des ennemis naturels, mais ils ont peu d'effet sur la diversité des insectes ravageurs, des pathogènes et des adventices (Estrada-Carmona *et al.*, 2022).

Cette sous-section présente les modalités de gestion du paysage par le biais de la composition et de la configuration du paysage, et leur influence sur les populations de bioagresseurs.

La gestion de la composition des paysages

La composition du paysage se définit comme « la quantité ou la diversité des différents types de couverture des sols présents dans un paysage » (Haan *et al.*, 2020). Les types de couverture des sols comprennent les habitats semi-naturels et les cultures (*ibid.*). La composition du paysage inclut la proportion d'habitats semi-naturels et de parcelles cultivées (Médiène *et al.*, 2011), et la diversité ou l'hétérogénéité des types de couverture, y compris la diversité des habitats semi-naturels et la diversité des cultures dans le paysage (Fahrig *et al.*, 2015).

La composition du paysage influence le niveau de contrôle biologique et d'abondance des ravageurs dans les parcelles (Rusch *et al.*, 2016b). Les paysages plus complexes, avec une plus grande proportion d'habitats semi-naturels, favorisent la présence d'ennemis naturels (Bianchi *et al.*, 2006, Chaplin-Kramen *et al.*, 2011) et ont une abondance de ravageurs plus faible que dans les habitats simplifiés. L'étude de Rusch *et al.* (2016a) démontre qu'une simplification extrême du paysage (passage de 2 % de terres cultivées à 100 %) réduit le contrôle naturel des ravageurs de 46 %.

La composition des paysages joue un rôle déterminant dans la gestion des ravageurs à travers trois facteurs : les habitats semi-naturels, la diversité de la mosaïque des cultures, et la gestion des pratiques agricoles dans les systèmes d'exploitation agricole qui sont présentés ci-dessous.

La gestion des habitats semi-naturels

Les habitats semi-naturels fournissent des ressources et assurent des fonctions clés pour les ennemis naturels des bioagresseurs (Rusch *et al.*, 2016b). Les habitats semi-naturels comprennent à la fois des espaces boisés tels que les forêts et les haies, et des espaces herbacés comme les bordures de parcelles et de routes, les jachères et les prairies. Ces habitats, plus stables que les cultures annuelles et relativement peu perturbés, offrent des fonctions vitales aux ennemis naturels, comme des sites d'hivernage, des zones refuges sans perturbation, de la nourriture, des fleurs, des proies et des hôtes alternatifs (Bianchi *et al.*, 2006 ; Rusch *et al.*, 2016b). Selon Keller et Häni (2000), neuf organismes bénéfiques sur dix ont besoin d'habitats semi-naturels

au cours de leur cycle de vie, alors que ce n'est le cas que pour une espèce de ravageurs sur deux.

Cependant, les interactions trophiques sont complexes et la réponse de la composition du paysage est variable. En fonction des espèces de ravageurs et d'ennemis naturels, de leurs caractéristiques, des types de cultures, des types d'habitats semi-naturels et des pratiques agricoles, l'impact de la composition du paysage sur la lutte contre les ravageurs change considérablement (Tscharrntke *et al.*, 2016 ; Karp *et al.*, 2018).

Une quantité minimum d'habitats semi-naturels est nécessaire pour assurer la présence d'ennemis naturels des ravageurs dans le paysage (Sirami *et al.*, 2019). En effet, les habitats semi-naturels apportent des habitats stables (*ibid.*). D'après Sirami *et al.* (2019), augmenter la diversité des cultures a un effet positif sur la biodiversité des paysages qui comportent une quantité minimale d'espaces semi-naturels (>11 %). Cela confirme l'hypothèse de la complémentarité du paysage. En revanche, des cultures diversifiées auraient un impact négatif sur la diversité trophique si la quantité d'espaces semi-naturels était inférieure à 4 % ; cela s'explique par l'hypothèse du « minimum de surface d'habitat total requis » qui veut que certaines espèces aient besoin d'un minimum de surface d'habitat semi-naturel pour vivre. Dans la littérature, il est considéré qu'un paysage complexe nécessite au moins 20 % d'habitats semi-naturels (Tscharrntke *et al.*, 2005 ; Batàry *et al.*, 2011 ; Scheper *et al.*, 2013 ; Lichtenberg *et al.*, 2017). Tscharrntke *et al.* (2021) et Garibaldi *et al.* (2021) considèrent qu'un minimum de 20 % d'habitats semi-naturels est nécessaire pour maintenir la biodiversité et les services écosystémiques connexes, y compris la lutte contre les ravageurs.

Cependant, les habitats semi-naturels doivent être régulièrement distribués dans l'espace (Garibaldi *et al.*, 2021). La qualité des éléments semi-naturels est également un facteur déterminant. Différents types d'habitats semi-naturels peuvent abriter des ennemis naturels distincts (Bianchi *et al.*, 2006). De plus, la continuité temporelle des habitats semi-naturels est également un facteur important de maintien de la biodiversité (Boetzl *et al.*, 2021).

La composition du paysage a également un impact sur les communautés d'adventices (Petit *et al.*, 2012). Les paysages complexes abritent des habitats plus diversifiés et sont associés à des communautés d'adventices plus diversifiées (*ibid.*). La consommation des graines des adventices cultivées, en particulier par les carabes granivores, qui assurent la suppression des adventices, est favorisée par les habitats semi-naturels en bordure des parcelles (Petit *et al.*, 2018). Les populations d'oiseaux, qui consomment également des graines d'adventices, sont aussi favorisées par les habitats semi-naturels (Heikkinen *et al.*, 2004).

La diversité de la mosaïque des cultures

La mosaïque des cultures est la combinaison des différentes parcelles de cultures au sein du paysage. La composition de la mosaïque de cultures peut être définie comme l'« hétérogénéité compositionnelle » de la mosaïque de cultures, et fait référence à la

diversité des types de couverture, c'est-à-dire à la richesse et l'uniformité des cultures (Fahrig *et al.*, 2015). Elle résulte de la somme des choix individuels des différents agriculteurs dans leur système d'exploitation ; ces choix dépendent des caractéristiques de l'environnement, des ressources de l'exploitation et des contraintes logistiques (Vasseur *et al.*, 2013). La mosaïque de cultures change d'une année à l'autre, en fonction des séquences de cultures et des systèmes d'exploitation des agriculteurs (Vasseur *et al.*, 2013). Selon une expertise récente (Tibi *et al.*, 2023), l'augmentation de la diversité de la mosaïque des cultures a un effet positif sur la lutte contre les insectes ravageurs aériens et des effets attendus sur la lutte contre les pathogènes aériens et à transmission vectorielle.

L'augmentation de l'hétérogénéité de la composition de la mosaïque de cultures peut améliorer la biodiversité (Sirami *et al.*, 2019), et ainsi favoriser les populations d'ennemis naturels dans le paysage. Par exemple, Redlich *et al.* (2018) ont constaté que le contrôle biologique des pucerons dans les paysages à forte diversité de cultures était de 8 % à 33 % plus élevé que dans les paysages à faible diversité de cultures. De plus, Halliday et Rohr (2019) ont montré que la propagation des maladies des plantes augmente avec la perte de biodiversité à l'échelle locale.

Les effets des pratiques culturelles à l'échelle des paysages

Les pratiques culturelles associées au système d'exploitation ont des effets à l'échelle des paysages sur les dynamiques des populations d'insectes ravageurs et des ennemis naturels.

En effet, les populations de ravageurs et d'ennemis naturels dépendent des ressources des parcelles cultivées, en particulier lorsque la proportion d'habitats semi-naturels dans le paysage est faible (Rusch *et al.*, 2010). Ainsi, la présence de parcelles cultivées en agriculture biologique dans le paysage a des effets positifs sur la biodiversité par rapport à l'agriculture conventionnelle, cependant cet effet dépend du contexte paysager (Tuck *et al.*, 2014). L'agriculture biologique a plus d'impact sur la biodiversité dans les paysages simplifiés comportant une grande quantité de parcelles arables (*ibid.*). Cela suggère que les paysages complexes abritent déjà un niveau élevé de biodiversité et que les pratiques locales de gestion des cultures y ont moins d'impact sur la biodiversité (Rusch *et al.*, 2016b). En ce qui concerne les adventices, la présence de fermes biologiques dans le paysage renforce l'activité des carabes qui jouent un rôle dans la prédation des graines (Diekötter *et al.*, 2016).

La gestion de la configuration du paysage

La configuration du paysage correspond à l'agencement spatial, la taille et la forme des différents types d'habitats dans le paysage (Haan *et al.*, 2020). La configuration spatiale des paysages affecte la biodiversité, les populations d'ennemis naturels et la gestion des ravageurs, des adventices et des pathogènes (Haan *et al.*, 2020 ; Petit *et al.*, 2018 ; Bousset, 2020).

Les paragraphes ci-dessous présentent les effets de la configuration (i) des habitats semi-naturels, (ii) de la mosaïque de cultures et (iii) des éléments au sein de la parcelle sur les bioagresseurs et les populations d'ennemis naturels.

L'influence de la configuration des habitats semi-naturels sur la gestion des ravageurs et les adventices

Différents facteurs influencent les processus écologiques de régulation des ravageurs à l'échelle du paysage : l'arrangement spatial entre les habitats semi-naturels et les cultures, la densité des bordures, la granulométrie des éléments du paysage, et la connectivité des paysages.

Pour certains ennemis naturels, la présence d'individus dans la parcelle dépend de la colonisation d'individus provenant d'habitats semi-naturels en bordure de champ ; d'autres ennemis naturels ont un mouvement bidirectionnel, en se déplaçant entre les cultures et les habitats semi-naturels (Tschardt *et al.*, 2007). La possibilité pour un ennemi naturel de déborder dans les cultures et de se comporter en prédateur des ravageurs des cultures dépend de la distance entre les habitats semi-naturels et les cultures (*ibid.*). Ainsi, l'accroissement de la longueur des interfaces entre les cultures et les habitats semi-naturels favorise la présence d'ennemis naturels à l'intérieur des parcelles (Bianchi *et al.*, 2006). Pour avoir un effet sur les ravageurs, les habitats semi-naturels doivent donc être régulièrement distribués dans l'espace (Garibaldi *et al.*, 2021).

La configuration du paysage peut être mesurée « comme la densité des bordures entre les parcelles cultivées et leur environnement », comprenant les cultures voisines et les habitats semi-naturels (Martin *et al.*, 2019). Les bordures de champ peuvent être des écotones champ-champ (sans végétation permanente), des bandes herbeuses, des haies, des murs, des fossés ou des combinaisons de ces éléments ; les bordures permanentes constituent des refuges pour de nombreuses espèces (Clough *et al.*, 2020). Martin *et al.* (2019) constatent que le contrôle des ravageurs par leurs ennemis naturels est le plus élevé dans les paysages comportant une faible proportion de terres arables (< 40 %) et une forte densité de bordures. À l'inverse, les ravageurs sont favorisés par un paysage à faible densité de bordures. Martin *et al.* (2019) suggèrent d'avoir entre 0,2 et 0,4 km/ha de densité de bordures pour favoriser la lutte contre les ravageurs.

La granulométrie d'un paysage est « la taille moyenne (diamètre ou surface) des parcelles d'habitat dans un paysage » (Haan *et al.*, 2020). La granulométrie peut être mesurée par la densité des bordures. Les paysages à granulométrie fine se caractérisent par une densité de bordures élevée, permettant de favoriser les ennemis naturels et de faciliter leur déplacement entre les bordures et l'intérieur des parcelles (*ibid.*). Les formes irrégulières ou compliquées des parcelles peuvent également faciliter la colonisation des ennemis naturels à l'intérieur des parcelles (*ibid.*).

La configuration du paysage peut également affecter la diversité et la distribution des adventices (Petit *et al.*, 2012). Les paysages à granulométrie fine avec une forte densité de bordures ont tendance à favoriser l'immigration aléatoire de nombreuses espèces de

semences dans la parcelle (*ibid.*). Cependant, la dispersion des adventices se produit à grande échelle spatiale et temporelle, en particulier par le biais du matériel agricole et des animaux, et dépend donc de la configuration du paysage et de l'hétérogénéité des cultures (et principalement des réseaux de transport et des bordures de parcelles ; *ibid.*).

La connectivité des paysages est le degré auquel un paysage facilite le mouvement des organismes et de la matière, c'est-à-dire de l'eau, de l'air et du sol (Mitchell *et al.*, 2013). Elle influence la biodiversité, la survie des différentes espèces et le fonctionnement des écosystèmes. La connectivité du paysage est altérée par le changement de type d'habitat et la fragmentation de l'habitat (Mitchell *et al.*, 2013), cette dernière ayant un impact négatif sur la biodiversité (Fahrig, 2003).

L'influence de la taille des parcelles sur la configuration de la mosaïque des cultures

L'accroissement de l'hétérogénéité de la mosaïque de cultures, en particulier la réduction de la taille des parcelles, améliore la biodiversité et favorise les ennemis naturels des ravageurs des cultures (Sirami *et al.*, 2019 ; Clough *et al.*, 2020). La réduction de la taille des parcelles de 5 ha à 2,8 ha a le même impact sur l'augmentation de la biodiversité que l'augmentation de la surface des habitats semi-naturels de 0,5 à 11 % (*ibid.*). De plus, Sirami *et al.* (2019) observent que l'effet de la réduction de la taille des parcelles n'est pas seulement dû à l'augmentation des habitats semi-naturels entre les parcelles, mais aussi à la diversification de la mosaïque des cultures (*ibid.*).

L'hétérogénéité configurationnelle des parcelles devrait également avoir des effets sur la propagation des maladies. La réduction de la taille des parcelles ou de la proportion d'une culture dans le paysage permet de limiter la connectivité spatiale de l'agent pathogène (Bousset, 2020). En limitant la densité des cultures hôtes et en évitant la contiguïté entre les sources de spores et les parcelles hôtes, l'augmentation de l'hétérogénéité des cultures réduit la dispersion de l'inoculum pathogène (*ibid.*).

L'arrangement spatial des éléments de la parcelle

En bordure de parcelle, les plantations ligneuses hautes et denses, telles que les haies, les plantations de séparation et les haies brise-vent, agissent comme des barrières physiques qui peuvent interférer et limiter les mouvements des insectes ravageurs et des spores des agents pathogènes (Ratnadass *et al.*, 2012).

L'arrangement spatial des cultures dans la parcelle peut influencer la lutte contre les ravageurs. Différentes formes de cultures associées ou de mélanges variétaux sont possibles : cultures associées mixtes, cultures associées en ligne, cultures associées en bandes ou cultures associées en patch (Finckh et Wolfe, 2006).

En ce qui concerne les cultures pérennes : leur arrangement spatial est un levier pour améliorer la lutte contre les ravageurs. La densité et la forme de la plantation peuvent influencer le déplacement des ravageurs et des ennemis naturels (Laget *et al.*, 2015 ;

Simon, 2019). Une application concrète est l'expérimentation du verger de Gotheron menée par INRAE en France qui expérimente l'optimisation de la configuration d'un verger afin de le rendre « suppressif » aux ravageurs. Le verger est planté en cercles concentriques, car cette forme minimise le rapport périmètre/surface, limitant l'effet de bordure et l'entrée des ravageurs (Simon, 2019). Le cercle externe d'arbres hauts joue le rôle de barrière et de brise-vent et fournit des ressources diversifiées aux ennemis naturels (*ibid.*). La disposition spatiale des autres cercles ligneux est pensée selon différentes fonctions : production primaire et secondaire, barrières physiques et chimiques, effet de dilution, effet d'attraction, amélioration de la biodiversité. D'autres infrastructures permettent d'améliorer la biodiversité et d'accroître les populations d'ennemis naturels, comme un étang central, des nichoirs, des perchoirs à rapaces, et des inter-rangs de luzerne (*ibid.*).

■ L'amélioration variétale et la gestion des ressources génétiques

L'amélioration variétale pour mieux gérer les bioagresseurs

Le patrimoine génétique d'une culture lui confère de nombreuses propriétés, notamment celle d'être moins sensible aux bioagresseurs (résistance aux pathogènes et aux ravageurs) ou de diminuer leur impact ou leur présence (compétitivité face aux adventices par exemple). L'amélioration variétale est donc indispensable pour une agriculture sans pesticides chimiques, car les variétés dont on dispose actuellement n'ont pas été sélectionnées pour ce type de conduite. Elle doit aussi prendre en compte le changement climatique qui va imposer des stress abiotiques susceptibles d'influencer les cortèges de bioagresseurs, voire l'émergence de nouveaux cortèges. Les recherches à mener en génétique devront définir et intégrer de nouveaux critères de sélection pour atteindre l'objectif d'une agriculture sans pesticides chimiques en impliquant l'ensemble des acteurs de la filière semence, et plus largement l'ensemble des acteurs agricoles, dont les agriculteurs qui mettent en œuvre les pratiques culturales sur les variétés (Laperche *et al.*, 2022). En ce sens, l'amélioration variétale devra aussi mobiliser les stratégies de sélection intégrant les approches participatives, complémentaires des approches de sélection classique.

La sélection classique pratiquée depuis plusieurs décennies a eu pour objectif principal de créer des variétés très productives (à haut potentiel de rendement) lorsqu'elles sont cultivées dans des conditions optimales, avec pour conséquence une réduction drastique de la diversité génétique des espèces cultivées due notamment au développement, à la concentration et à la standardisation du marché des semences. Un autre objectif de la sélection des espèces cultivées était de faciliter leur utilisation dans les processus de transformation agroalimentaire. En revanche, la résistance aux bioagresseurs n'était pas un objectif de sélection étant donné que la lutte contre les bioagresseurs était assurée par le recours aux pesticides de synthèse. Les variétés sélectionnées étaient donc très sensibles aux bioagresseurs. Par ailleurs, ces variétés n'étaient pas adaptées à certaines pratiques culturales (comme la diversification)

utilisées pour gérer les bioagresseurs. La résistance (et la tolérance) aux bioagresseurs, en particulier aux maladies, fait aujourd'hui partie des critères de sélection et d'inscription au catalogue pour la grande majorité des espèces cultivées (Jacquet et Jouan, 2022b). Afin de produire des cultures sans pesticides chimiques, il est désormais nécessaire de définir de nouveaux objectifs de sélection intégrant de nouveaux critères et de nouvelles stratégies d'amélioration génétique des plantes orientées vers la prophylaxie et la diversification des cultures. La réponse des plantes à des stress (biotiques tels que les bioagresseurs, et abiotiques tels que le changement climatique), seuls ou en combinaison, est un enjeu d'importance pour la sélection (Laperche *et al.*, 2022).

La sélection classique sur des critères de résistance durable

La durabilité des gènes de résistance (c'est-à-dire la durée pendant laquelle cette résistance offre un contrôle épidémiologique satisfaisant dans un environnement favorable à la maladie) et la recherche d'une plus grande diversité des mécanismes moléculaires de résistance constituent actuellement un enjeu majeur de la création variétale (Laperche *et al.*, 2022). Les connaissances acquises au cours des dernières décennies sur les bases moléculaires des mécanismes de résistance et sur les interactions entre plantes et bioagresseurs ont contribué au développement de stratégies de sélection visant à améliorer la résistance des plantes cultivées aux bioagresseurs. Les schémas de sélection actuels sont principalement basés sur des types variétaux présentant peu d'hétérogénéité génétique (lignées pures, hybrides F₁, clones ; Laperche *et al.*, 2022). Les sélectionneurs se sont longtemps appuyés sur l'utilisation de résistances sous contrôle monogénique, mais ces défenses sont de courte durée et rapidement contournées par le bioagresseur grâce à ses fortes capacités évolutives. À l'inverse, la résistance contrôlée par des QTL (*quantitative trait loci*, à effet mineur et quantitatif) est considérée comme plus durable et n'est généralement pas spécifique de la souche de l'agent pathogène (Laperche *et al.*, 2022). La sélection s'oriente désormais vers la recherche de tolérance durable aux bioagresseurs, plutôt que vers la recherche de résistance (contournable par les bioagresseurs).

D'autres pistes de recherche sont également à l'étude comme l'identification des gènes de résistance qui « équilibrent » le compromis entre résistance et production (Deng *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2018), ou qui limitent l'effet négatif des protéines de défense sur la croissance des plantes (Xu *et al.*, 2017). L'identification des gènes contrôlant les caractères d'intérêt nécessite de disposer d'outils de phénotypage adaptés pour cibler les traits d'intérêt, et de méthodes d'analyse génétique appropriées. En ce sens, les nouvelles techniques d'édition du génome permettent d'envisager d'autres voies de création variétale dont il convient d'examiner les implications potentielles. 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 (Laperche *et al.*, 2022). 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, et maintenir des résistances durables (Aubertot *et al.*, 2006 ; Delière *et al.*, 2017 ; Papaix *et al.*, 2013).

Outre la sélection de variétés résistantes ou tolérantes, les défis de la sélection devront également porter sur d'autres caractères tels que la réponse de la culture au biocontrôle, aux stimulateurs de défense des plantes, aux biostimulants, au microbiote du sol, aux conditions pédoclimatiques locales, à la mise en place d'architectures aériennes et racinaires défavorables aux ravageurs, ou encore aux processus de coévolution entre la culture et le ravageur (atelier d'experts, avril 2021).

La sélection sur de nouveaux critères de diversification des cultures

Comme développé précédemment, une diversité d'espèces et de variétés dans les parcelles cultivées favorise la résistance du couvert végétal aux bioagresseurs susceptibles d'infester la parcelle (Jeuffroy *et al.*, 2022). La culture de mélanges variétaux, choisis pour leurs résistances complémentaires, permet également de maintenir, voire d'accroître légèrement le rendement (Borg *et al.*, 2018 ; Vallavieille-Pope *et al.*, 2006). L'association d'espèces différentes dans les parcelles est aussi un moyen efficace de lutte contre les bioagresseurs (Stomph *et al.*, 2020).

Les programmes de sélection visant à créer des variétés adaptées aux mélanges, des « variétés populations » ou des espèces adaptées aux associations et aux contextes locaux restent encore peu développés (Enjalbert *et al.*, 2019 ; Laperche *et al.*, 2022). Le défi pour les sélectionneurs réside dans la capacité à évaluer et sélectionner les futures variétés pour leur valeur en propre, et surtout pour leur capacité à être mélangées et à développer des interactions positives entre plantes voisines au sein de la parcelle cultivée (Annicchiario *et al.*, 2019). Construire un mélange optimisé adapté aux conditions locales du milieu conduit donc à identifier les composantes (variétés ou espèces) dont les traits sont différents et complémentaires, favorisant la résistance du couvert cultivé face aux bioagresseurs. D'une manière générale, les schémas de sélection devront favoriser l'hétérogénéité génétique des parcelles et des paysages (Litrice et Violle, 2015).

Deux stratégies sont envisagées pour la conception des mélanges : (i) sélectionner des variétés ayant des capacités à être cultivées en mélange pour constituer des mélanges à haute performance ; (ii) sélectionner séparément un ensemble de variétés sur la base de leurs traits fonctionnels pour répondre à un ensemble de services recherchés (Barot *et al.*, 2017).

Les associations d'espèces et les mélanges variétaux sont de plus en plus utilisés en grandes cultures mais ils sont encore quasiment inexistant dans les autres systèmes de culture (viticulture, arboriculture, maraîchage). On peut toutefois citer l'exemple

de vignes conduites en biodynamie (Cravero, 2019 ; Doring *et al.*, 2019) ou encore l'exemple du verger expérimental de Gotheron (Simon, 2019 ; Penvern *et al.*, 2018) dont l'organisation spatiale des espèces cultivées et la forme circulaire des habitats semi-naturels visent à « casser » la monotonie génétique de la parcelle (Jeuffroy *et al.*, 2022). On assiste également à l'émergence de vergers-maraîchers (mélangeant des espèces maraîchères et fruitières) qui posent encore des questions de travail et de rentabilité à court et long termes (Paut *et al.*, 2021).

La sélection sur de nouveaux critères intégrant le sol et les micro-organismes

Le développement des régulations biologiques des bioagresseurs dans des systèmes sans pesticides chimiques nécessite d'intégrer également des concepts écologiques d'interaction entre les plantes et leur environnement modulés par les micro-organismes (Gopal et Gupta, 2016). En effet, le microbiome du sol joue un rôle crucial dans la croissance et la santé de la plante, notamment dans sa capacité d'adaptation face à des stress abiotiques ou à des bioagresseurs. Le fonctionnement de la rhizosphère, correspondant à la zone de sol soumise à l'activité des racines, est une interface majeure entre la plante et son environnement (Carof *et al.*, 2018) ; la capacité des plantes à recruter des micro-organismes et à se maintenir dans cet environnement est cruciale pour une agriculture sans pesticides chimiques (Laperche *et al.*, 2022).

Les prochains programmes d'amélioration variétale devront prendre en compte la capacité des plantes à interagir avec le microbiome du sol pour recruter des micro-organismes permettant aux plantes de mieux se défendre vis-à-vis des bioagresseurs et de limiter leur développement dans le sol. La sélection pourrait par exemple viser à renforcer les interactions entre les plantes et les micro-organismes du sol, à produire des graines adaptées aux communautés microbiennes locales (dans la parcelle) et aux pratiques culturales, ou encore à améliorer la nutrition des plantes grâce aux micro-organismes (Hunter *et al.*, 2014).

La sélection participative pour développer des « variétés populations »

La diversité génétique est aussi mise en valeur par les agriculteurs se situant dans une démarche de sélection participative pour l'échange de semences et la mise en œuvre de croisements et de mélanges variétaux ainsi que d'associations d'espèces spécifiques (Jacquet *et al.*, 2022). La sélection participative aide à préserver les ressources génétiques *in situ* face au changement climatique et aux pratiques innovantes (Hawtin *et al.*, 1996). L'hypothèse scientifique sous-jacente est que le maintien d'une pression évolutive sur ces ressources génétiques permet de maintenir des gènes d'adaptation intéressants. Chez le blé par exemple, par l'intermédiaire de la gestion dynamique *in situ* des ressources génétiques développée dans le cadre de programmes de sélection participative, 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).

Plusieurs exemples montrent 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 ; Jeuffroy *et al.*, 2022) malgré les verrouillages des systèmes sociotechniques (Meynard *et al.*, 2018) et des marchés des semences. Une telle 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 parcelles en lien avec la production de services écosystémiques. Les « variétés populations » ainsi obtenues grâce à la sélection participative se distinguent par leur forte adaptabilité aux conditions locales biotiques et abiotiques. Leur diversité génétique leur confère une résistance durable aux bioagresseurs et une plus grande tolérance aux stress abiotiques. En revanche, ces « variétés populations » se caractérisent généralement par une plus faible productivité.

Face au défi posé d'une agriculture sans pesticides chimiques, les programmes de sélection à développer devront associer les approches classiques *ex situ* du sélectionneur aux approches participatives *in situ* menées avec les agriculteurs pour créer de nouvelles variétés adaptées à l'environnement pédoclimatique local et aux pratiques culturelles locales (Dawson et Goldberger, 2008).

Le cas particulier des plantes pérennes et de la relation porte-greffe-greffon

La sélection de variétés résistantes est essentielle pour les cultures pérennes (viticulture, arboriculture, maraîchage) pour lesquelles les moyens de lutte contre les bioagresseurs, en dehors de la lutte chimique, restent limités. Les variétés et les porte-greffes des différentes espèces de vignes, de vergers ou de légumes peuvent présenter des degrés variables de sensibilité aux maladies ou aux ravageurs, voire une résistance totale à certaines souches de maladies (Laget *et al.*, 2015). Le greffage ou le surgreffage de variétés adaptées aux porte-greffes permet de modifier rapidement le comportement de l'ensemble de la plante ou de l'arbre sans modifier la ressource génétique de la variété greffée.

Jusqu'à présent, la majorité des études se sont concentrées sur les greffons et très peu sur les porte-greffes (Warschefsky *et al.*, 2016). Les connaissances sur le potentiel de l'association porte-greffe-greffon pour améliorer la résistance des plantes ou des arbres restent encore fragmentaires et empiriques. Par exemple, sur le pommier, la réponse aux stimulateurs de défense de la plante peut varier en fonction du choix de l'association porte-greffe-greffon ; et chez l'abricotier, l'association porte-greffe-greffon peut être résistante à un parasite donné, alors que le porte-greffe et le greffon, pris séparément, sont sensibles à ce parasite.

Des programmes de sélection de porte-greffes devront être mis en place pour améliorer la résistance variétale des espèces pérennes (atelier d'experts, février 2021). Le choix du porte-greffe est déterminant, car il conditionne le comportement de la culture et sa production pendant plusieurs décennies. Par exemple, les porte-greffes devront

être plus tolérants à des inoculums qui peuvent durer plusieurs années, même si la recherche de cette tolérance se traduit par une perte de production. Le choix du porte-greffe devra également favoriser les interactions positives entre le système racinaire du porte-greffe et les micro-organismes du sol.

2. Les signaux faibles pour la protection des cultures et les effets potentiels du changement climatique à long terme

Drouet J.-L.

I Signaux faibles indiquant des voies possibles d'évolution de la protection des cultures

La contribution des leviers biologiques et génétiques à la protection des cultures s'est historiquement effectuée grâce aux méthodes d'amélioration variétale. Depuis la fin du XIX^e siècle, avec les premiers croisements de plantes présentant des traits de résistance aux bioagresseurs, les méthodes et les technologies n'ont cessé de progresser pour produire des variétés cultivées porteuses de gènes de résistance totale (ou qualitative, souvent monogénique), mais pouvant être rapidement contournée par les bioagresseurs, ainsi que des variétés cultivées porteuses de gènes de résistance partielle (ou quantitative, polygénique) moins facilement contournable par les bioagresseurs. Compte tenu du contournement rapide des gènes de résistance dans cette « course aux armements » entre la plante cultivée et son bioagresseur, les méthodes classiques d'amélioration variétale tendent à produire des résistances peu durables et montrent ainsi leurs limites.

Les recherches sur la résistance des plantes cultivées se sont récemment orientées autour du concept d'immunité végétale qui considère l'ensemble des fonctions biologiques permettant aux plantes de résister aux bioagresseurs. Ce concept correspond à une vision systémique de la santé de la plante et prend en compte les interactions ainsi que la coexistence entre la plante hôte et son bioagresseur. Plus récemment, il a encore été élargi au concept d'immunité agroécologique, prenant en compte l'ensemble des interactions entre la plante hôte et son environnement biotique et abiotique.

D'autres travaux ont également été engagés récemment pour mieux comprendre la complexité des populations de plantes cultivées en interaction avec leur environnement biotique autre que leurs bioagresseurs. Ces travaux portent notamment sur (i) la présence de micro-organismes potentiellement bénéfiques aux plantes cultivées et (ii) la présence de plantes voisines avec lesquelles elles peuvent interagir par l'émission ou la réception de signaux positifs/attractifs ou négatifs/répulsifs (à savoir des signaux lumineux en quantité et en qualité, des signaux chimiques ou allélopathiques

au travers de composés volatils aériens et d'exsudats racinaires, ou encore des signaux mécaniques par le toucher).

L'amélioration de la résistance des plantes aux bioagresseurs

Les mécanismes de défense des plantes face aux bioagresseurs

Les plantes ont développé au cours de l'évolution un système immunitaire complexe qui leur permet de survivre face aux bioagresseurs et dans des conditions environnementales parfois défavorables, notamment dans le contexte actuel de changement climatique qui favorise l'émergence de nouvelles épidémies (Roby, 2021). Les travaux de recherche de ces trente dernières années ont permis de mieux comprendre les mécanismes moléculaires qui sous-tendent l'immunité des plantes, révélant une complexité et une robustesse inattendues. Dans le cas d'une interaction entre une plante et un bioagresseur, une succession ou cascade d'événements se met en place en commençant par la reconnaissance des deux partenaires, suivie de la transduction de signaux émis à l'interface, et vont conditionner la réponse finale, à savoir la mise en place de réactions de défense (Aubertot *et al.*, 2005b).

Une première ligne de défense passive est formée par l'ensemble des barrières physiques (par exemple, cuticule, paroi cellulaire, épines, fines excroissances de l'épiderme appelées trichomes) et chimiques (par exemple, phénols, lignine des parois, métabolites secondaires). Ces défenses préexistantes constituent un premier obstacle pour protéger la plante (Favery et Coustau, 2021), mais ne garantissent pas un niveau de sécurité suffisant (Trémousaygue et Deslandes, 2021). Les plantes ont aussi développé des mécanismes de défense active qui peuvent être moléculaires. La molécule « signal » produite par le bioagresseur peut en effet induire la stimulation de gènes de défense de la plante et déclencher la production de molécules de défense telles que les phytoalexines (par exemple, composés phénoliques, terpénoïdes, polyacétylènes) ou de composés impliqués dans la signalisation de l'agression vers d'autres cellules, voire à l'ensemble de la plante par systémie (par exemple, acide salicylique, éthylène, acide jasmonique). L'induction de résistance d'une plante consiste à stimuler des mécanismes de défense naturelle présents dans la plante, mais qui sont à l'état latent. Les stimulateurs des défenses naturelles (SDN) ou stimulateurs des défenses des plantes (SDP) sont des substances (c'est-à-dire des molécules ou des mélanges de molécules, d'origine naturelle ou synthétique, organique ou minérale) capables de déclencher les mécanismes de défense naturelle des plantes avant l'attaque par des bioagresseurs (par exemple, Hammerschmidt *et al.*, 2001). Peu de SDN et de SDP sont actuellement sur le marché. En voici trois exemples : le chitosan, un polysaccharide dérivé de la chitine ; l'harpine, un peptide produit par la bactérie *Erwinia* ; les glycosphingolipides, extraits de la membrane de champignons (Benhamou et Rey, 2012). Toutefois, l'efficacité des SDN et des SDP contre les insectes ou les nématodes reste peu documentée et nécessite des études supplémentaires (Favery et Coustau, 2021). Les stimulateurs de défense des plantes peuvent agir en synergie ou de manière antagoniste avec les biostimulants de la croissance des plantes.

Les mécanismes de défense des plantes peuvent aussi être immunitaires (par exemple, la perception du non-soi, laquelle peut être de type général ou plus spécifique selon la nature des molécules reconnues) ou encore signalétiques (par exemple, les facteurs de transcription et la réponse hormonale). Les processus moléculaires mis en évidence sont complexes (Trémousaygue et Deslandes, 2021) et nécessitent des ajustements subtils du métabolisme cellulaire pour optimiser la réponse immunitaire sans altérer le développement de la plante. Après avoir été abordée par des approches réductionnistes, l'étude des mécanismes de défense immunitaire des plantes doit maintenant évoluer vers des approches holistiques (Zhang *et al.*, 2020). Trémousaygue et Deslandes (2021) préconisent que les futurs programmes de sélection mobilisent la diversité des mécanismes d'immunité et les combinent afin de développer une immunité moins facilement contournable par les bioagresseurs.

Les interactions entre la plante hôte et le bioagresseur peuvent aussi avoir lieu dans un contexte biotique parfois complexe (Ravigné *et al.*, 2021). En effet, la plante fait face à de multiples bioagresseurs, avec des mécanismes de résistance plus ou moins spécifiques. Réciproquement, les bioagresseurs n'interagissent pas qu'avec leurs hôtes et leur existence a des répercussions directes et indirectes sur d'autres acteurs de l'écosystème.

Les experts mobilisés ont identifié trois grands types de mécanismes (ou approches ou stratégies) pour renforcer la résistance des plantes aux bioagresseurs :

- Stimuler les mécanismes de défense des plantes (SDP) avec des molécules, des micro-organismes ou d'autres outils, mais ces approches restent empiriques et donnent des résultats plus ou moins satisfaisants en situation au champ, avec des compromis (synergiques ou antagonistes) entre les mécanismes de résistance des plantes et les mécanismes de croissance et de développement. Comme cela a été mentionné plus haut, les interactions entre la plante et son environnement biotique et abiotique sont très complexes et interviennent dans la construction génétique de la plante ou l'introgession de certains traits dans la plante. Il est ainsi nécessaire de prendre en compte les environnements biotiques (par exemple, les microbiotes) et abiotiques de la plante (par exemple, la température ou l'humidité) qui favorisent la résistance de la plante et la durabilité de cette résistance (il en va de même à l'échelle des populations de plantes et à des échelles spatiales encore plus grandes).
- Agir sur les mécanismes génétiques de résistance aux bioagresseurs en utilisant les techniques d'édition de génome (par exemple, CRISPR-Cas), employées sur un nombre croissant de plantes. La synthèse de petits ARN et de petits peptides présents dans la plante (et notamment dans les semences) et utilisés par la plante pour se défendre est une voie à continuer à explorer. Ces petits ARN restent toutefois difficiles à manipuler dans le cadre législatif européen ; d'autres travaux sont aussi en plein essor actuellement : (i) la recherche de combinaisons de gènes favorables à la résistance des plantes dépassant l'approche classique focalisée sur les gènes majeurs de résistance très rapidement contournés par les bioagresseurs, et (ii) l'inactivation de gènes s'appuyant sur un raisonnement qui concernerait le gain

de résistance ou le gain de fonction. Cette technique est actuellement très prometteuse en pathologie pour cibler les gènes de sensibilité de la plante et les inactiver.

- Utiliser la variabilité génétique naturelle des plantes. Ceci fait actuellement l'objet d'importants travaux dans l'objectif d'éviter les autres biotechnologies, plus ou moins bien acceptées.

Au-delà de ces trois grandes voies, les experts mobilisés ont aussi souligné la nécessité d'une plus grande prise en compte des interactions, dans toute leur complexité, entre les plantes et leur environnement biotique et abiotique. Ces interactions incluent notamment le rôle des interactions entre plantes (chapitre 2, section 2, p. 83-86) qui influent sur les mécanismes de l'immunité et de la résistance, et qui constituent un levier pour une agriculture sans pesticides chimiques, ou encore le rôle majeur du microbiote (chapitre 2, section 2, p. 80-83) dans l'immunité et la résistance des plantes face aux bioagresseurs.

Les connaissances à acquérir sur l'immunité végétale et les interactions complexes entre la plante cultivée et son environnement proche (c'est-à-dire à l'intérieur des parcelles) et plus éloigné (c'est-à-dire à l'échelle des paysages) ouvrent une voie prometteuse pour la protection des cultures par voie biologique, notamment par la stimulation ou le renforcement des mécanismes de défense des plantes.

Les contournements de résistance et la « course aux armements »

Un des principaux échecs de l'utilisation de variétés résistantes est l'adaptation des bioagresseurs cibles par des contournements de résistance. La nécessité d'introduire constamment de nouveaux gènes de résistance qualitative dans les variétés entraîne une « course aux armements » (aussi appelée théorie de la Reine rouge) entre les améliorateurs des plantes et les bioagresseurs (Ravigné *et al.*, 2021). Les améliorateurs peuvent alors chercher à combiner le génie génétique et l'accumulation de gènes par pyramidage (c'est-à-dire par une stratégie consistant à cumuler plusieurs gènes de résistance dans une même variété), avec des méthodes génomiques de recherche de nouveaux gènes dans des espèces sauvages proches des espèces cultivées. Mais, même si les gènes d'infectivité présentent des coûts élevés pour les bioagresseurs, le renouvellement des variétés dans les productions annuelles ne permet pas d'enrayer la « course aux armements » chez ceux-ci, d'autant que les différentes variétés introduites sont souvent protégées par les mêmes gènes de résistance.

Cependant, compte tenu de la raréfaction des ressources génétiques et de la diversité chez les espèces sauvages, une simple « course aux armements » avec les bioagresseurs paraît illusoire. D'autres solutions sont à rechercher dans des stratégies de gestion des variétés résistantes, par exemple en promouvant une stratégie de « guerre des tranchées » en agriculture, afin de favoriser la durabilité des résistances. Ceci pourrait être mené notamment en augmentant la diversité génotypique des gènes de résistance dans une parcelle ou à l'échelle des paysages ou des régions.

Les changements globaux (par exemple, le changement climatique et les changements de pratiques culturales) vont aussi intervenir dans la régulation des populations de bioagresseurs (chapitre 2, section 2, p. 86-92) et interagir avec les leviers de réduction de la pression phytosanitaire ainsi qu'avec les leviers génétiques d'amélioration de la résistance des plantes. Compte tenu de la dynamique évolutive des interactions entre les plantes cultivées et les bioagresseurs, les réponses virulence-avirulence-résistance-sensibilité placent les plantes cultivées dans des contextes de sensibilité ou de vulnérabilité tels que les plantes cultivées sont toujours perdantes face aux bioagresseurs.

L'intérêt des plantes sauvages pour trouver de nouvelles résistances

Le compartiment naturel (aussi appelé sauvage), longtemps considéré comme un simple réservoir d'émergences de maladies infectieuses, est aussi un réservoir de connaissances et de pistes pour améliorer la conception et le déploiement des variétés résistantes (Ravigné *et al.*, 2021). Comprendre l'origine des maladies infectieuses, leur dynamique épidémiologique et leur dynamique d'adaptation est un préalable nécessaire à la conception de systèmes de culture durables (Zhan *et al.*, 2015). Un grand nombre de réponses aux questions des chercheurs se trouvent non pas dans les systèmes cultivés (agroécosystèmes), mais dans les écosystèmes naturels (Morris *et al.*, 2009 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2016). De nombreuses associations entre les plantes cultivées et les bioagresseurs sont récentes et résultent de l'adaptation d'un bioagresseur issu du milieu naturel sur une plante cultivée (c'est-à-dire le saut d'hôte ; Giraud *et al.*, 2010).

L'étude du compartiment sauvage reste difficile, notamment en raison du peu de ressources génétiques. Par exemple, seulement 6 % des virus connus ont été isolés du compartiment sauvage (Malmstrom *et al.*, 2011). Ce déficit de connaissances est particulièrement net dans le cas de maladies émergentes (Desprez-Loustau *et al.*, 2016). D'après les experts mobilisés, il est possible d'imaginer qu'en 2050, une plante cultivée sera capable de mimer l'immunité développée par une plante sauvage ou une plante apparentée. Cela pourrait être réalisé à partir du séquençage des ressources génétiques de la plante sauvage ou apparentée ainsi que par des modifications génétiques des traits de résistance des plantes cultivées face aux bioagresseurs. De telles modifications génétiques pourraient être réalisées en utilisant les technologies CRISPR-Cas9 ou d'autres méthodes qui auront été développées d'ici à 2050. Le rendement ou la production de fruits de la plante sauvage resterait toutefois faible, celle-ci allouant ses ressources principalement à sa défense et à sa survie. La plante sauvage pourrait être considérée comme une plante de service qui ne se récolterait pas, mais qui pourrait apporter un service d'immunité aux plantes cultivées situées à proximité, par exemple des configurations de parcelles avec les plantes cultivées au centre et les plantes de service (sauvages) à la périphérie de la parcelle, constituant ainsi une barrière physique aux bioagresseurs. Les plantes de service pourraient aussi rentrer en compétition avec les adventices pour l'accès aux ressources.

Les interactions entre les plantes cultivées et leur microbiome

À l'intérieur des parcelles cultivées, les plantes se développent en permanence en association avec des micro-organismes dont certains (par exemple, des bactéries, des champignons, des virus) provoquent des dégâts plus ou moins graves sur les plantes cultivées et pénalisent les récoltes et les rendements, alors que d'autres sont bénéfiques aux plantes cultivées en améliorant leur nutrition, en stimulant leur développement, ou encore en renforçant leur résistance ou immunité face aux bioagresseurs. La connaissance des interactions entre les plantes cultivées et les micro-organismes de leur environnement, ainsi que la compréhension de la manière dont les plantes cultivées peuvent tirer profit de la présence de micro-organismes phytobénéfiques, constituent un signal faible mais prometteur de lutte biologique des plantes cultivées face aux bioagresseurs, en particulier les ravageurs et les agents pathogènes.

L'importance de la diversité microbienne et du microbiome pour les plantes cultivées

La rhizosphère contient une grande quantité de micro-organismes considérés comme phytobénéfiques. Ces micro-organismes ne sont pas toujours actifs et, même s'ils colonisent bien les racines de la plante, leurs effets potentiels sur la plante cultivée s'expriment peu. D'après Ravigné *et al.* (2021), l'étude de la diversité microbienne associée aux plantes et des protéines produites par les micro-organismes et les plantes montre que les plantes forment des associations intimes avec certains micro-organismes et que ces derniers forment entre eux des associations qui peuvent être relativement stables et influencer la santé de la plante (Vorholt, 2012 ; Berg *et al.*, 2014).

D'après Mougel *et al.* (2019), les communautés microbiennes associées aux plantes ont un potentiel énorme et encore inexploité pour améliorer la résistance des plantes aux stress abiotiques et biotiques et *in fine* le rendement des cultures (Trivedi *et al.*, 2017). Les résultats obtenus sur de nouvelles fonctions du microbiote végétal ont conduit à accroître les efforts de recherche sur les communautés microbiennes associées aux plantes pour une production agricole durable. Les molécules produites par les micro-organismes ont le potentiel de remplacer les intrants chimiques (engrais et pesticides) utilisés dans l'agriculture conventionnelle. Plus précisément, la diversité et la composition du microbiote peuvent avoir un fort effet sur la tolérance au stress (Bernardo *et al.*, 2017), la santé des plantes (Mendes *et al.*, 2011) et la lutte contre les ravageurs ou les pathogènes (Bartoli *et al.*, 2016 ; Lachaise *et al.*, 2017). Dans une perspective plus fonctionnelle, le recrutement du microbiote végétal semble être un processus fin impliquant le système immunitaire inné de la plante qui contrôle l'accueil des micro-organismes bénéfiques tout en éliminant les pathogènes (Hacquard *et al.*, 2017). Le microbiote racinaire peut stimuler ou amorcer le système immunitaire des plantes en renforçant les défenses des plantes contre un large spectre de pathogènes (Bakker *et al.*, 2018).

Un nombre croissant de recherches se concentrent sur les associations et les relations entre le microbiote et les plantes hôtes (Tian *et al.*, 2020). Les travaux à mener sur le

microbiote, en interaction avec les plantes cultivées, devront associer des approches de recherche fondamentale et de recherche appliquée et porter sur (i) les symbioses mutualistes des micro-organismes fongiques et bactériens avec les plantes hôtes ; (ii) les maladies des plantes causées par le microbiote environnemental ; (iii) les mécanismes permettant d'améliorer la croissance, la productivité et la résistance des plantes cultivées ainsi que la qualité des produits récoltés ; ou encore (iv) les effets allélochimiques entre les plantes et le microbiote (Tian *et al.*, 2020).

Des recherches seront aussi à développer sur des questions fondamentales telles que la détection des signaux phylogénétiques qui pourraient être phytobénéfiques ou encore les modes d'action (synergiques et antagonistes) des micro-organismes modulateurs de l'immunité de la plante hôte (Vannier *et al.*, 2019).

Le concept d'holobionte

Le concept d'holobionte est apparu ces dernières années comme un cadre théorique et expérimental pour étudier les interactions entre les hôtes et leurs communautés microbiennes associées dans tous les types d'écosystèmes (Simon *et al.*, 2019). L'holobionte est défini comme un assemblage d'espèces comprenant des plantes cultivées et leurs micro-organismes associés dans le sol et la rhizosphère, la phyllosphère et l'endosphère (*ibid.*). Au-delà de la plante individuelle, ce concept mobilise l'ensemble des holobiontes présents dans la parcelle et le paysage (par exemple, les agents pathogènes dont les champignons, les ravageurs dont les insectes ainsi que l'ensemble des micro-organismes et macro-organismes du système de culture). Les recherches sur le concept d'holobionte ont surtout porté sur les agents pathogènes, des travaux débutent sur les ravageurs (principalement les insectes) et concernent encore très peu les adventices. Une meilleure connaissance des holobiontes et des interactions entre les plantes hôtes et les communautés microbiennes associées devraient permettre de faire évoluer les programmes d'amélioration variétale vers la sélection plus systémique d'holobiontes fonctionnels (chapitre 2, section 3, p. 101-102), dont la sélection de cortèges microbiens bénéfiques aux plantes hôtes cultivées. Il s'agit aussi d'être capable de suivre et de piloter les holobiontes afin d'actionner les leviers adéquats aux bons moments (par exemple, l'amélioration génétique des plantes cultivées, les pratiques culturales, notamment les amendements organiques et les apports de micro-organismes) pour renforcer l'immunité des plantes cultivées.

L'importance des communautés microbiennes dans les communications entre plantes

Les associations symbiotiques entre les racines des plantes et les champignons sont extrêmement courantes, la symbiose mycorhizienne à arbuscules étant présente chez plus de 70 % des espèces végétales (Cosme *et al.*, 2018). Les plantes sont ainsi inévitablement interconnectées par l'intermédiaire des champignons mycorhiziens dans un « réseau mycorhizien commun » (CMN, pour *common mycorrhizal network* en anglais)

qui pourrait transférer des signaux entre plantes au travers de la surface externe des hyphes, du flux cytoplasmique ou de la conduction de signaux électriques (Barto *et al.*, 2012 ; Johnson et Gilbert, 2015). Par exemple, il a été suggéré que des molécules de signalisation (par exemple, l'acide jasmonique) peuvent être transférées par le CMN, ce qui permet d'amorcer la défense des plantes voisines face à l'infection par des pathogènes (Song *et al.*, 2010) et à l'herbivorie des pucerons ou des chenilles (Babikova *et al.*, 2013 ; Song *et al.*, 2014). Le rôle du CMN est encore peu documenté et, pour l'instant, seul son effet sur la compétitivité des plantes par le transfert de nutriments et la promotion de la croissance a été mis en évidence (Delavaux *et al.*, 2017 ; Parniske, 2008 ; Smith et Smith, 2012).

D'après les experts mobilisés, les études sur les interactions entre les populations microbiennes de plantes et de pathogènes ont jusqu'à présent surtout porté sur des interactions binaires entre les plantes, ou entre les plantes et les micro-organismes. L'enjeu est maintenant de traiter la complexité de ces interactions qui sont influencées par un grand nombre de facteurs biotiques et abiotiques. La progression des connaissances sur les interactions entre l'immunité des plantes et les communautés microbiennes associées (endophytes, de la rhizosphère et de la phyllosphère) d'ici à 2050 devrait permettre de sélectionner des variétés plus adaptées et résistantes aux conditions agropédoclimatiques locales. L'implantation géographique des variétés devra aussi être réévaluée en fonction de l'évolution du climat (chapitre 2, section 2, p. 86-92).

L'impact des pratiques culturales sur les microbiotes

L'impact des pratiques culturales sur le microbiote du sol et des plantes a été peu étudié jusqu'à présent et les connaissances à acquérir devraient permettre de développer des pratiques agricoles visant la suppression des pesticides chimiques et de considérer les microbiotes comme une nouvelle génération verte de produits (Mougel *et al.*, 2019).

Les mélanges variétaux ou les associations d'espèces ont un rôle dans le développement des communautés microbiennes phytobénéfiques. Des travaux en écologie théorique ont montré l'intérêt des mélanges variétaux pour améliorer la productivité des cultures et limiter le développement d'agents pathogènes (Litrico *et al.*, 2015). Les associations d'espèces végétales peuvent modifier considérablement l'abondance et la composition du microbiote du sol, avec un effet bénéfique sur la croissance et la production des cultures (Mougel *et al.*, 2019). Les biostimulants pourraient renforcer la capacité d'une plante à absorber des nutriments, à réguler son état physiologique et à résister à des stress biotiques et abiotiques. Les biostimulants, bien qu'agissant au niveau foliaire et à faible dose, pourraient aussi agir sur le système racinaire et modifier, positivement ou négativement, le microbiote de la rhizosphère.

Les pratiques culturales devraient également viser à favoriser les communautés microbiennes phytobénéfiques déjà présentes dans le sol en mobilisant les leviers appropriés (notamment les amendements organiques, l'implantation d'intercultures, la mise

en place de rotations longues, le choix d'intrants qui n'endommagent pas le microbiote existant). Par exemple, des niveaux trop élevés de fertilisation minérale peuvent entraîner une acidification des sols défavorisant les symbioses trophiques. De telles limites sont à intégrer dans les réflexions sur les itinéraires techniques.

Les systèmes d'agriculture conventionnelle et biologique ont un grand impact sur la diversité et la composition du microbiote du sol qui est plus hétérogène dans les systèmes gérés biologiquement que dans ceux gérés conventionnellement (Lupatini *et al.*, 2017). D'autres travaux ont montré que les amendements organiques en agriculture biologique favorisent davantage la diversité des communautés microbiennes que la fertilisation minérale en agriculture conventionnelle (Hartman *et al.*, 2018).

Le microbiote des semences

Une partie du microbiote végétal est transmis verticalement, notamment par les graines. Le développement de solutions de renforcement de l'immunité des plantes cultivées et de protection des cultures reposant sur le microbiote des semences apparaît être une voie prometteuse, mais peu de connaissances sont disponibles sur les processus et les fonctions remplies par les consortia microbiens et leurs effets sur l'immunité et la vigueur des semences (Barret *et al.*, 2019). Quelques études ont montré que le microbiote des semences pourrait améliorer leur germination, mais leur rôle dans la protection des plantes contre les agents pathogènes est encore méconnu (Escobar Rodriguez *et al.*, 2020). Les nouvelles approches utilisant des communautés microbiennes synthétiques (SynComs) pourraient permettre d'explorer les liens de causalité entre le microbiote et la plante hôte (Vorholt *et al.*, 2017).

Toutefois, seule une très petite partie (environ 1 %) du microbiote peut être transmis verticalement de la semence à sa descendance et les micro-organismes présents au début de la vie de la plante vont progressivement disparaître lors du développement de la plante. De plus, les semences sont stérilisées dans les pratiques actuelles, ce qui rompt la chaîne de transmission de leur microbiote. Le poids à donner au microbiote des semences doit donc être relativisé par rapport à celui du contexte agropédoclimatique.

Les interactions entre les plantes cultivées et les autres plantes (cultivées, apparentées, sauvages, adventices)

Jusqu'au début des années 1980, les plantes étaient traditionnellement considérées comme passives, affectées par leurs voisins uniquement par des effets indirects sur la disponibilité des ressources (Pierik *et al.*, 2013). Les interactions entre les plantes cultivées et les autres plantes (cultivées, apparentées, sauvages, adventices) ont toujours été négligées (Vicherová *et al.*, 2020). Cependant, au cours des trente à quarante dernières années, des travaux de plus en plus nombreux ont montré que les plantes détectent leurs voisines et interagissent avec elles. Ces interactions sont souvent assez subtiles et lentes, et peuvent aussi être peu intuitives et surprenantes (Bilas *et al.*, 2021). De même que les interactions entre les plantes cultivées et leur

microbiote, les interactions entre les plantes cultivées et leurs voisines sont encore mal connues, mais constituent un signal faible et prometteur pour la protection des cultures face aux bioagresseurs, et particulièrement face aux adventices présentes dans les parcelles cultivées.

Les mécanismes de détection des plantes voisines

Le stress biotique le plus important et le plus durable qu'une plante peut rencontrer est probablement celui de ses voisines, notamment les plantes adventices, qui représentent une menace directe pour l'accès aux ressources (lumière, eau et nutriments minéraux).

Plusieurs travaux ont montré que les plantes sont capables de distinguer les individus génétiquement apparentés et les individus étrangers, et de présenter des comportements plus coopératifs envers leurs parents (Anten et Chen, 2021). Les effets de la reconnaissance de parenté vont bien au-delà de la réduction de la compétition pour les ressources entre les plantes apparentées et impliquent des interactions avec les symbiotes (par exemple, les réseaux mycorhiziens). La reconnaissance de la parenté a donc probablement des implications importantes pour l'évolution des traits des plantes, la diversité des populations végétales, les réseaux écologiques, les communautés microbiennes et *in fine* l'immunité des plantes. La sélection sur la parenté est potentiellement prometteuse pour l'amélioration variétale des cultures, car elle pourrait produire des variétés avec des traits moins compétitifs, et donc une meilleure performance de la population (Anten et Chen, 2021).

Les interactions entre plantes voisines sont ici vues comme des signaux (lumineux en quantité et en qualité, chimiques ou allélopathiques par les composés volatils aériens et les exsudats racinaires, ou mécaniques par le toucher ; Bennett, 2021). Les connaissances sont encore manquantes sur les interactions entre plantes voisines, notamment sur les mécanismes, les traits d'intérêt ou les gènes impliqués (Bilas *et al.*, 2021) pour pouvoir les prendre en compte dans les programmes d'amélioration variétale et évaluer leur contribution potentielle à la protection des cultures.

Les signaux lumineux

Les organes végétaux absorbent, reflètent et diffusent le rayonnement solaire entrant, réduisant ainsi le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), le rapport rouge clair / rouge sombre (R:FR ratio) et la lumière bleue (Bilas *et al.*, 2021). Cela crée un signal de présence des plantes voisines, distinct des fluctuations de la quantité et de la qualité de la lumière ambiante. Les plantes sont extrêmement sensibles à ces perturbations de la qualité de la lumière et elles peuvent utiliser des signaux lumineux pour se détecter mutuellement sur des distances importantes en l'absence d'ombrage (Roig-Villanova et Martínez-García, 2016). Les extrémités des feuilles sont le principal site de détection des signaux lumineux, ce qui réduit la probabilité que l'auto-ombrage déclenche ces réponses (Pantazopoulou *et al.*, 2017). Urban *et al.* (2017) ont constaté que les flashes de lumière UV-C ont le potentiel d'amorcer les défenses des plantes sur

une large gamme de cultures et d'agents pathogènes. En travaillant sur l'oïdium du fraisier ainsi que sur le mildiou et l'oïdium de la vigne, ces auteurs ont montré que de tels flashes (doses et fréquences des traitements) sont plus efficaces que les rayonnements photosynthétiquement actifs (PAR) continus, ce qui suggérerait l'existence de réponses physiologiques spécifiques. Ces travaux sur les réponses des plantes à leurs voisines montrent qu'elles interagissent entre elles de manière active par l'envoi et la perception de signaux lumineux (Huber *et al.*, 2021).

Les composés organiques volatils, signaux chimiques aériens

Les plantes peuvent détecter la présence de plantes voisines et répondre rapidement à une compétition ou à une menace potentielle par l'émission de composés organiques volatils (COV). Par exemple, une indication de la proximité d'une plante émettrice peut être « déduite » par une plante réceptrice en raison de la vitesse de diffusion rapide des composés hautement volatils par rapport aux composés modérément volatils (Baldwin, 2010 ; Heil et Karban, 2010 ; Ninkovic *et al.*, 2013). Les émissions de COV seraient très efficaces sur de courtes distances alors qu'elles s'atténueraient rapidement sur de plus longues distances (Heil et Adame-Álvarez, 2010). La nature simple des signaux COV permettrait également l'écoute clandestine par des voisins non apparentés (Heil et Karban, 2010 ; Ninkovic *et al.*, 2013). Les connaissances sont encore manquantes sur les COV impliqués et les mécanismes mis en jeu dans la distinction entre plantes voisines, ainsi que sur la perception des COV par les plantes voisines. Par ailleurs, les études récentes ont montré que la détection des COV par les plantes est principalement associée à l'amorçage de la défense, plutôt qu'à la réponse de la plante à la présence de plantes voisines (Bilas *et al.*, 2021).

Les exsudats racinaires, signaux chimiques souterrains

Les plantes exsudent des quantités importantes de molécules organiques dans le sol (Bais *et al.*, 2003), qui jouent un grand nombre de rôles fonctionnels tels que le conditionnement du sol en modifiant ses propriétés adhésives ou son pH (Vives-Peris *et al.*, 2020). Les plantes libèrent également des molécules de signalisation qui favorisent la formation de symbioses bénéfiques avec des micro-organismes, suppriment les agents pathogènes et agissent de manière allélopathique (Ehlers *et al.*, 2020 ; Rolfe *et al.*, 2019). Les plantes peuvent détecter le mélange de produits chimiques exsudés par d'autres plantes et y répondre par des modifications de l'architecture et de la croissance de leurs racines (Biedrzycki *et al.*, 2010 ; Kong *et al.*, 2018 ; Semchenko *et al.*, 2014 ; Yang *et al.*, 2018 ; Bilas *et al.*, 2021). Les exsudats racinaires ont régulièrement été suggérés comme des facteurs clés dans la capacité apparente des plantes à distinguer le soi du non-soi, ainsi que le parent du non-parent (Biedrzycki *et al.*, 2010 ; Semchenko *et al.*, 2014 ; Yang *et al.*, 2018). Les candidats suggérés jusqu'à présent (par exemple, l'acide jasmonique) semblent susceptibles d'être des signaux génériques, impliqués dans le déclenchement de réponses larges telles que l'allélopathie (Kong *et al.*, 2018). Les strigolactones sont une classe de phytohormones qui sont

également exsudées dans le sol et jouent un large rôle de signalisation dans la rhizosphère, notamment en favorisant la formation d'associations mycorhiziennes (Waters *et al.*, 2017). Les molécules exsudées ne sont toutefois pas toutes phytobénéfiques et une question majeure non encore résolue est la production de molécules toxiques pour les plantes voisines indésirables et non toxiques pour la plante elle-même.

Le « toucher », signal mécanique

Les plantes sont naturellement exposées à des contraintes mécaniques par une série de facteurs (par exemple, le vent, les insectes, les obstacles physiques) et des mécanismes leur permettent de détecter ces stress mécaniques et d'y répondre, ce qui peut être vu comme une réponse au « toucher » (Hamant et Haswell, 2017). Ces stress mécaniques peuvent être capables de stimuler la défense des plantes (Li et Gong, 2011). L'efficacité du stimulus mécanique dépend de la longueur (c'est-à-dire de la dose ; par exemple, la flexion transitoire exercée sur la tige) et de la répétitivité (c'est-à-dire la fréquence) du signal et moins de la force appliquée (Coutand et Moulià, 2000 ; Anten *et al.*, 2010 ; Coutand *et al.*, 2010). Les plantes sont sensibles au toucher, même léger, des plantes voisines, ce qui constitue un indicateur rapide de leur présence (Markovic *et al.*, 2016). Ces stimuli tactiles sont perçus avec une grande sensibilité par les trichomes des feuilles et les extrémités des racines (Massa et Gilroy, 2003 ; Zhou *et al.*, 2017). Le toucher des plantes voisines semble jouer un rôle particulièrement important dans l'amorçage des plantes pour d'autres interactions, et il a été constaté qu'il modifie à la fois la libération des COV et des exsudats racinaires (Elhakeem *et al.*, 2018 ; Markovic *et al.*, 2019). Le toucher reste un indice très simple et son supposé rôle dans la transmission d'informations sur l'identité des plantes voisines reste à démontrer (Bilas *et al.*, 2021).

■ Effets potentiels du changement climatique à long terme

D'après la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV, 2021), le changement climatique constitue un défi singulier pour la santé des végétaux. Il affectera les écosystèmes et les systèmes de production agricole dans le monde entier, aura un impact sur les flux commerciaux internationaux de produits agricoles et influera également sur le pouvoir infectieux, la gravité et la répartition des bioagresseurs à travers le monde.

Au cours des dernières décennies, les travaux de recherche sur la biologie du changement climatique ont connu un essor considérable, en particulier ces dix dernières années. De manière générale, la plupart des études soulignent que le risque phytosanitaire lié aux insectes, aux agents pathogènes et aux adventices augmentera dans les écosystèmes agricoles sous l'effet du changement climatique, notamment dans les régions actuellement les plus froides (arctiques et boréales), et aussi dans les régions tempérées et subtropicales. Cette aggravation des problèmes phytosanitaires concernera les écosystèmes aménagés (agriculture, horticulture, sylviculture, etc.), semi-aménagés (parcs nationaux, par exemple) et aussi probablement les écosystèmes non aménagés.

Effets des facteurs bioclimatiques sur les bioagresseurs et sur les interactions entre bioagresseurs et plantes cultivées

Au cours des trente à quarante dernières années, plusieurs études ont cherché à évaluer les effets de plusieurs facteurs (augmentation des températures, de la concentration en dioxyde de carbone, de l'ozone ou du rayonnement ultraviolet B, évolution des conditions hydriques ou d'humidité) sur l'incidence et la gravité des phytopathologies (CIPV, 2021). Les études ont porté sur les bioagresseurs qui affectent les cultures de plein champ comme le blé, l'orge, le riz, le soja et la pomme de terre (Bregaglio *et al.*, 2013 ; Evans *et al.*, 2008 ; Launay *et al.*, 2014 ; Luck *et al.*, 2011 ; Mikkelsen *et al.*, 2014), les cultures horticoles (Gullino *et al.*, 2018 ; Koo *et al.*, 2016), les cultures tropicales et de plantation (Ghini *et al.*, 2011) et les arbres forestiers (Battisti, 2008 ; Jactel *et al.*, 2019 ; Sturrock *et al.*, 2011).

Les effets du changement climatique sur les espèces de bioagresseurs sont complexes et se caractérisent par des effets directs sur ces derniers et des effets indirects, notamment sur les plantes cultivées hôtes, ainsi que par des interactions entre ces différents effets. En un lieu donné, toute modification du réchauffement et des autres conditions climatiques et atmosphériques peut avoir des effets directs ou indirects sur les insectes ravageurs, les agents pathogènes et les adventices. En général, toutes les étapes importantes du cycle de vie des insectes ravageurs, des agents pathogènes et des adventices (survie, reproduction et dissémination) sont plus ou moins directement influencées par la température, l'humidité relative, la quantité de lumière ou sa qualité, le vent ou toute combinaison de ces facteurs. Les processus physiologiques de la plupart des espèces de bioagresseurs sont particulièrement sensibles aux variations de température (Juroszek *et al.*, 2020).

Principales hypothèses d'évolution d'ici à 2050

Les principales hypothèses d'évolution jusqu'en 2050 concernant le changement climatique et ses effets sur les bioagresseurs et les interactions entre les bioagresseurs et les plantes (tableau 2.3) portent sur les éléments suivants.

- Le changement climatique : augmentation moyenne des températures (de 1 °C, 1,5 °C, voire 2 °C) et des concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) à la surface du globe ; augmentation des précipitations (et de l'humidité) aux latitudes boréales et tempérées du nord de l'Europe, mais diminution aux latitudes tempérées et subtropicales du sud de l'Europe ; variations spatiales et temporelles des facteurs climatiques, avec de fortes incertitudes, en raison de l'augmentation des événements extrêmes (canicules et sécheresses, précipitations abondantes et inondations, tempêtes, etc.) et des aléas climatiques.
- L'effet du changement climatique sur les différents types de bioagresseurs et sur les interactions entre les bioagresseurs et les plantes cultivées hôtes :
 - les insectes ravageurs dont la physiologie et la dynamique sont principalement influencées par la température, mais aussi par l'humidité et le vent, ainsi que par

les interactions qui seront affectées par les conditions de température, d'humidité, de sécheresse et de concentration en CO_2 notamment ; l'effet du changement climatique sur ces interactions pourrait produire un effet positif en maintenant ou en renforçant le synchronisme entre le ravageur et la plante cultivée hôte ou, à l'inverse, un effet négatif en désynchronisant les étapes du cycle de vie du ravageur de celles de la plante hôte ;

- les agents pathogènes, principalement influencés par la température et l'humidité, qui agissent sur l'ensemble du cycle de vie du pathogène, notamment sur son développement et sa dispersion, sur la production et la maturation de l'inoculum, ainsi que sur les conditions d'infection ; comme pour les ravageurs, le changement climatique pourrait avoir un effet sur les interactions et le synchronisme (ou l'asynchronisme) entre l'agent pathogène et la plante hôte ;

- les adventices dont la croissance et le développement dépendent, comme pour les plantes cultivées, de la température, des précipitations et des concentrations en CO_2 ; cependant, à la différence des plantes cultivées, les adventices ont un bagage génétique beaucoup plus diversifié, ce qui leur confère une plus grande adaptabilité que les plantes cultivées aux variations et aléas climatiques et aux événements extrêmes ; par ailleurs, si les plantes cultivées (du fait de leur métabolisme de fixation du carbone en C_3 ¹²) seraient avantagées par une augmentation de la concentration en CO_2 , les adventices (du fait de leur métabolisme de fixation du carbone en C_4), seraient plus tolérantes et donc mieux adaptées à des conditions plus chaudes et plus sèches.

- Des effets du changement climatique communs aux différents types de bioagresseurs, avec des modifications :

- des aires de répartition géographique des bioagresseurs (et des cultures) avec la latitude et l'altitude en lien avec l'augmentation globale des températures ; on pourrait observer une expansion de l'aire de répartition des bioagresseurs aux latitudes boréales et tempérées, et sa réduction ou sa disparition aux latitudes subtropicales et tempérées ; dans les nouveaux contextes agropédoclimatiques générés par le changement climatique pourrait également apparaître un risque accru d'introduction de bioagresseurs pouvant devenir invasifs, notamment des ravageurs ou des adventices qui serviraient d'hôtes secondaires aux agents pathogènes ;

- de la phénologie saisonnière, notamment le moment de l'activité printanière ; toutes les étapes du cycle de vie des bioagresseurs seront affectées par le changement climatique qui perturbera aussi, positivement ou négativement, les synchronismes de développement entre les bioagresseurs, leurs plantes hôtes et leurs ennemis naturels ;

- de la dynamique des populations de bioagresseurs ; on pourrait observer une augmentation de la survie hivernale, du taux de croissance des populations et du nombre de générations au cours d'une saison.

12. Dans la photosynthèse des plantes en C_3 , la première molécule produite par la fixation du CO_2 est un sucre à trois atomes de carbone (C_3). Chez les plantes en C_4 , il s'agit d'un sucre à quatre atomes de carbone.

Les nombreux travaux menés sur l'effet des facteurs climatiques sur les bioagresseurs et sur les interactions entre les bioagresseurs et les plantes cultivées montrent des résultats spécifiques au bioagresseur et à la plante étudiés, ainsi qu'aux conditions agropédoclimatiques de l'étude. Ces résultats spécifiques mettent ainsi en doute leur généralisation pour un même type de bioagresseur (ravageur, agent pathogène ou adventice) et même au sein d'une même espèce. Les généralisations doivent donc être envisagées avec beaucoup de précautions et les chercheurs doivent se montrer très prudents lorsqu'ils extrapolent leurs résultats.

Tableau 2.3. Principales hypothèses d'évolution jusqu'en 2050 concernant le changement climatique et ses effets sur les bioagresseurs et les interactions entre les bioagresseurs et les plantes

Tendances climatiques à l'horizon 2050 en Europe

- Augmentation de la température et de la concentration en CO₂, sécheresses aux latitudes moyennes
- Augmentation des aléas climatiques et des événements extrêmes

Insectes ravageurs

- Effet principalement de la température sur la physiologie et la dynamique des insectes
- Effet de l'humidité, de la sécheresse, du vent et de la concentration en CO₂ sur la physiologie des insectes et des plantes hôtes
- Synchronisme entre les insectes et les plantes hôtes

Pathogènes fongiques

- Effet principalement de la température et de l'humidité sur le développement et la dispersion des pathogènes, la production et la maturation de l'inoculum ainsi que sur les conditions d'infection

Adventices

- Effet de la concentration en CO₂, de la température et des précipitations sur la croissance des adventices
- Grande diversité génétique et plus grande adaptabilité des adventices (par rapport aux cultures) aux variations climatiques et aux événements extrêmes

Effets du changement climatique communs à tous les bioagresseurs

- Répartition géographique des bioagresseurs (en particulier en latitude et en altitude en lien avec la température) : expansion, réduction ou disparition de l'aire de répartition des bioagresseurs, risques accrus d'introductions de bioagresseurs (invasifs)
- Phénologie saisonnière : activité printanière, synchronisation des événements du cycle de vie des bioagresseurs avec leurs plantes hôtes et leurs ennemis naturels
- Dynamique des populations de bioagresseurs : hivernage et survie, taux de croissance des populations, nombre de générations de bioagresseurs au cours d'une saison

Conditions générales

- Utilisation de la correspondance climatique pour simuler la répartition des bioagresseurs
- Incertitudes dues aux aléas climatiques, aux événements extrêmes et à leurs étendues et variations géographiques
- Généralisation ou extrapolation difficile au sein d'un des trois types de bioagresseurs

CO₂ : dioxyde de carbone.

Les données mettent en évidence que tous les climats et tous les écosystèmes seront affectés, non seulement par l'évolution des conditions bioclimatiques moyennes (en particulier la température et la concentration en CO₂), qui sont prévisibles en s'inscrivant dans une tendance observée depuis plusieurs décennies, mais aussi dans la survenue de plus en plus fréquente d'événements extrêmes et d'aléas climatiques dont le moment, l'étendue géographique et l'ampleur restent aujourd'hui imprévisibles et

rendent les prévisions locales ou régionales des différents facteurs climatiques hautement incertaines. Il en résulte que la nature et l'ampleur de l'impact du changement climatique sur les bioagresseurs et leurs interactions avec les plantes cultivées hôtes varieront en fonction de la capacité des systèmes de production et des écosystèmes naturels à s'adapter et à évoluer.

Le changement climatique oblige déjà à modifier les stratégies de protection des végétaux et cette tendance va être amenée à se renforcer. Toute lutte climatiquement rationnelle contre les bioagresseurs implique la mise en œuvre d'approches holistiques dans les exploitations agricoles, les paysages et les territoires, et repose essentiellement sur l'utilisation de méthodes de lutte permettant d'améliorer l'atténuation du changement climatique et de renforcer la résilience des systèmes agricoles, parmi lesquelles les mesures curatives et aussi préventives de protection des végétaux sont des facteurs essentiels. Les aléas climatiques allant devenir de plus en plus fréquents, les activités de surveillance et de suivi (avec la mise au point d'indicateurs dont des indicateurs de résilience) des menaces phytosanitaires aux niveaux national, régional et international sont essentielles ; elles devront être renforcées par la conception et la mise en œuvre de programmes de surveillance et de suivi, afin de développer des mesures préventives et endiguer les menaces phytosanitaires.

Atténuation et adaptation des systèmes agricoles au changement climatique et aux bioagresseurs, ainsi qu'à leurs interactions

La plupart des scientifiques estiment que l'amélioration de la résistance des plantes hôtes constitue un moyen efficace d'adaptation de la protection des cultures aux conditions climatiques futures (Juroszek et von Tiedemann, 2015 ; Miedaner et Juroszek, 2021a et 2021b). Il apparaît déjà essentiel de disposer de variétés résistantes à la sécheresse, aux températures élevées et aux bioagresseurs. D'autres solutions existent, notamment les ajustements de la période de semis, l'allongement de la rotation des cultures, l'amélioration des systèmes de prévision de l'arrivée de bioagresseurs, l'ajustement des pratiques agronomiques comme l'irrigation et la fertilisation, et la fourniture de conseils ciblés (Juroszek et von Tiedemann, 2015). Il est à noter que plusieurs autres mesures potentielles d'adaptation en matière de protection des cultures, comme la modification du microclimat en faisant varier la densité de semis ou en agissant directement sur le microclimat (par exemple, la captation de CO₂), ne sont pas du tout abordées dans la littérature relative aux simulations du risque phytosanitaire.

Dans les secteurs de l'agriculture et de la sylviculture, il peut également s'avérer nécessaire d'adopter des stratégies climatiquement rationnelles pour lutter contre les bioagresseurs (Heeb *et al.*, 2019 ; Lipper *et al.*, 2014). La lutte intégrée contre les bioagresseurs comprend généralement un large éventail de mesures directes et indirectes de gestion phytosanitaire (Heeb *et al.*, 2019 ; Juroszek et von Tiedemann, 2011). Ces mesures comprennent notamment :

- le déplacement des zones de culture, qui a aussi été suggéré comme une adaptation possible en cas de scénario catastrophe, par exemple dans le cas du colza

(Butterworth *et al.*, 2010) ou encore dans le cas des fèves en Égypte, où leur culture a été déplacée du centre du pays vers la région plus fraîche du delta du Nil, dans le Nord, afin d'échapper aux effets néfastes des viroses, probablement dues, au moins en partie, au réchauffement climatique ;

- la surveillance attentive et la détection précoce de l'arrivée des bioagresseurs pour optimiser le calendrier des interventions (Heeb *et al.*, 2019 ; Strand, 2000) ; la FAO (2008) indique en effet que l'une des principales composantes de toute stratégie visant à lutter contre les dangers liés à l'introduction de bioagresseurs dans le contexte du changement climatique doit être la surveillance et le suivi, afin de pouvoir détecter les nouvelles introductions de bioagresseurs ; la FAO (2015) insiste sur la nécessité, notamment pour les agriculteurs, de participer à des dispositifs de surveillance et de prévention des risques lorsqu'ils existent ;
- le recours à l'expertise et à la « science citoyenne » pour détecter les nouvelles menaces phytosanitaires constitue aussi une piste prometteuse (FAO, 2015).

Vers une plus grande résilience des systèmes agricoles au changement climatique et aux bioagresseurs

La résilience est la capacité d'absorber un changement et d'anticiper une perturbation future par une capacité d'adaptation (Darnhofer, 2014 ; Urruty *et al.*, 2016). La capacité de résilience peut être appréciée par (i) la robustesse qui est la capacité intrinsèque d'un système à supporter les stress et les chocs non anticipés, et (ii) l'adaptabilité qui est la capacité d'un système à modifier la composition des intrants, la production, les modes de commercialisation et la gestion du risque en réponse aux stress et aux chocs, mais sans modifier sa structure et ses processus de rétroaction (Holling *et al.*, 2002 ; Meuwissen *et al.*, 2019).

D'après Holling (1973), une approche de gestion basée sur la résilience « mettrait l'accent sur la nécessité de garder les options ouvertes et de concevoir des systèmes capables d'absorber et d'accommoder les événements futurs, quelle que soit la forme inattendue qu'ils puissent prendre ». Les concepts liés à la résilience socio-écologique ont été appliqués aux agroécosystèmes, avec par exemple l'identification de seuils et de leurs interactions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et de la région (Anderies *et al.*, 2006 ; Kinzig *et al.*, 2006 ; Walker *et al.*, 2009 ; van Apeldoorn *et al.*, 2011). Plus récemment, Darnhofer (2021) remarque que la tendance dominante actuelle consiste à comprendre la résilience comme la capacité à maintenir l'état actuel et non pas à effectuer un changement transformateur. Le maintien de l'état actuel a plusieurs implications dans le contexte agricole, détaillées à la suite.

- La tendance à chercher à maintenir l'état actuel présente le changement transformateur en termes négatifs. Le changement est compris comme étant induit par des chocs, des stress, des perturbations ou des événements indésirables. Cela implique que la stabilité est préférée au changement qui, au-delà d'un certain point, est souvent indésirable.

- L'accent mis sur les moteurs externes du changement a minimisé les moteurs internes, ce qui implique que le système est en équilibre dynamique à moins qu'il ne soit perturbé par des événements externes.
- Le changement transformateur, c'est-à-dire l'engagement dans de nouvelles voies de développement, est souvent mis de côté, car les nouvelles façons de penser et d'opérer qui conduisent à des trajectoires de développement inconnues ne sont pas au centre de l'attention. L'objectif implicite est généralement de permettre au système actuel de fonctionner aussi bien que possible, et non de le transformer. Cet objectif constitue un frein à l'étude des chocs en tant qu'opportunités de changement, à l'étude des moteurs internes en tant qu'éléments essentiels à la compréhension de la trajectoire d'un système, et à la prise en compte du changement transformationnel en tant que moyen de mettre en place un système plus souhaitable que le système actuel.

Le changement climatique, et plus largement les changements globaux et leurs impacts sur les systèmes agricoles, met en évidence la nécessité de changer de paradigme depuis une résilience visant à maintenir l'état actuel vers une résilience visant à engager un changement transformateur. Un tel changement implique la mise en œuvre d'approches holistiques dans les exploitations agricoles, les paysages et les territoires.

Outre les connaissances encore à acquérir concernant les effets biophysiques du changement climatique sur les bioagresseurs et sur leurs interactions avec les plantes cultivées, il apparaît aussi primordial de faire porter les efforts sur le renforcement de la capacité de résilience des systèmes agricoles dans le contexte du changement climatique. Des compromis seront à trouver entre les différentes facettes de la résilience, entre le renforcement de la robustesse des systèmes actuels et leur transformation vers des systèmes et des organisations territoriales mieux adaptés au changement climatique.

Des travaux seront aussi à développer pour notamment (i) évaluer les méthodes actuelles de protection des plantes au regard des scénarios de changement climatique projetés (Delcour *et al.*, 2015) ; (ii) mieux corrélérer les simulations des futurs risques phytosanitaires aux modèles de culture afin de fournir des informations sur les pertes de rendement potentielles ; (iii) intégrer les éventuelles mesures d'adaptation et d'atténuation dans les modélisations (Juroszek et von Tiedemann, 2015) ; (iv) intensifier la recherche sur les mesures d'adaptation et d'atténuation pour réduire les risques phytosanitaires (Hoffmann *et al.*, 2019) ; et (v) adapter les systèmes d'aide à la décision aux modifications de fréquence des événements extrêmes et des aléas climatiques, voire à des scénarios entièrement nouveaux (Garrett *et al.*, 2020).

3. Trois hypothèses de rupture pour une protection des cultures et des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050

Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouël C., Kieffer V., Paresys L.
Avec les contributions de Aubertot J.-N., Chauvel B., Enjalbert J.,
Julier B., Leclerc M., Ricroch A., Vaudour E.

Cette section présente les hypothèses de rupture élaborées au cours de la prospective pour imaginer une protection des cultures et des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050. Elle s'appuie sur les analyses des deux sections précédentes où ont été identifiés d'une part les modes d'action existants pour une protection des cultures sans pesticides chimiques (chapitre 2, section 1), ainsi que les signaux faibles indiquant des voies possibles d'évolution de la protection des cultures et les effets potentiels du changement climatique à long terme (chapitre 2, section 2). Elle s'appuie également sur les résultats de deux ateliers d'experts sur les « Systèmes de culture » menés en 2021 (voir la liste des experts contributeurs dans le tableau A.6). Le premier avait pour objectif d'identifier des hypothèses de rupture pour des stratégies de gestion des bioagresseurs sans pesticides. Le second atelier visait à compléter et à valider les hypothèses élaborées précédemment puis à construire des microscénarios de systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050. Les résultats de ces ateliers sont présentés dans cette section.

I Reconcevoir la protection des plantes et identifier des ruptures possibles

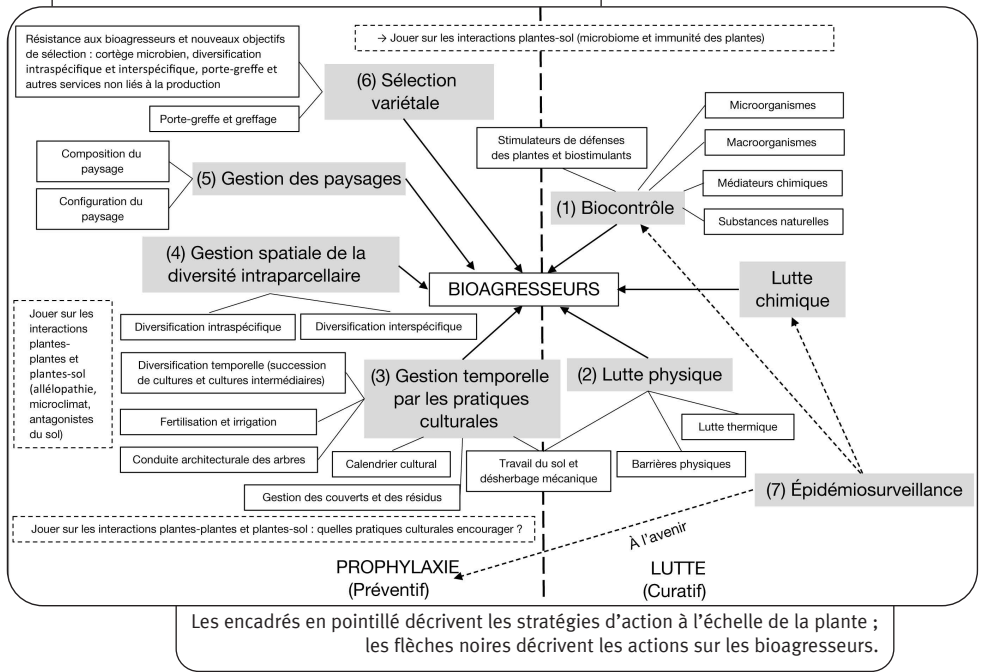
Schéma synthétique de protection des cultures

Six modes d'action pour gérer les bioagresseurs sans pesticides chimiques ont été définis dans la première section de ce chapitre : (i) le biocontrôle ; (ii) la lutte physique ; (iii) la gestion temporelle par les pratiques culturales ; (iv) la gestion spatiale de la diversité intraparcellaire ; (v) la gestion des paysages ; et (vi) la sélection variétale. Le schéma synthétique de la protection des cultures (figure 2.1) reprend les éléments présentés dans la section 1 du chapitre 2.

La gestion des bioagresseurs peut se faire grâce à des moyens de lutte (stratégie curative) et de prophylaxie (stratégie préventive).

En ce qui concerne les stratégies curatives, en dehors des pesticides chimiques, la lutte (partie droite de la figure 2.1) comprend le biocontrôle et la lutte physique. Par biocontrôle, on entend ici les produits de biocontrôle (la lutte biologique par conservation est intégrée dans un autre mode d'action) comme les substances naturelles (biopesticides), les médiateurs chimiques, les macro-organismes et les micro-organismes, ainsi que, par extension, les stimulateurs de défense des plantes et les biostimulants. La lutte physique est également une stratégie de lutte qui intègre le travail du sol (qui est aussi prophylactique) et le désherbage mécanique, l'usage de barrières physiques comme les filets, ainsi que les moyens de luttés thermique, électromagnétique et pneumatique.

Figure 2.1. Schéma synthétique des modes d'action pour la protection des cultures



Pour ce qui concerne la prophylaxie (partie gauche de la figure 2.1), les stratégies préventives comprennent la gestion temporelle par les pratiques culturales, la gestion spatiale de la diversité intraparcellaire, la gestion à l'échelle des paysages ainsi que la sélection variétale.

Le premier mode d'action par prophylaxie est la gestion temporelle par les pratiques culturales qui concerne le travail du sol, la gestion des résidus et des couverts, le calendrier culturel (date et densité de semis et récolte), la fertilisation et l'irrigation, la conduite architecturale des arbres, ainsi que la diversification temporelle des cultures qui inclut les séquences de cultures et les cultures intermédiaires. Le deuxième mode d'action est la gestion spatiale de la diversité intraparcellaire des cultures par des mélanges variétaux, des associations de cultures et des associations entre cultures pérennes et annuelles (dont l'agroforesterie), qui permet notamment de favoriser la lutte biologique par conservation. Le troisième mode d'action prophylactique, la gestion à l'échelle des paysages, favorise les ennemis naturels des bioagresseurs (lutte biologique par conservation) et défavorise les bioagresseurs par la gestion des habitats semi-naturels et des cultures (annuelles et pérennes).

Enfin, la sélection variétale comporte plusieurs défis en plus de la sélection pour la résistance directe aux ravageurs (résistance aux maladies, résistance aux ravageurs, contrôle des adventices par l'allélopathie et la concurrence) ou la tolérance. Elle comprend de nouveaux objectifs de sélection tels que la sélection d'une semence avec un cortège microbien, la sélection des variétés pour des mélanges et de « variétés populations » ou la combinaison d'espèces pérennes et annuelles, la sélection de porte-greffes, ainsi que la sélection pour renforcer les services non liés à la production. Il existe deux principaux types de stratégies de sélection, l'une menée par des entreprises privées de sélection (et également par des instituts publics) et l'autre réalisée par le biais de la sélection participative, généralement par les agriculteurs. Cette dernière est particulièrement intéressante pour identifier les semences adaptées au système de culture local et à la parcelle (en particulier aux conditions du sol et au microbiome du sol). Pour les cultures pérennes, le greffage est également un moyen de gérer les ressources génétiques (changement rapide de variété, résistance apportée par le porte-greffe).

Parmi tous ces modes d'action, certains ont des effets spécifiques sur les interactions plantes-plantes et plantes-sol (encadrés en pointillé de la figure 2.1). En effet, l'introduction de produits de biocontrôle influence les interactions plantes-sol et l'immunité de la plante. La diversification intraparcellaire et temporelle affecte les interactions plantes-plantes et plantes-sol (par les plantes allélopathiques, le changement du microclimat et le fait de favoriser des antagonistes du sol). Enfin, les pratiques culturales jouent aussi sur ces interactions et posent la question de la manière de favoriser des interactions positives plantes-plantes et plantes-sol.

Pour finir, même si l'épidémiosurveillance apparaît sur la figure 2.1, elle n'est pas un mode d'action en soi, car elle ne permet pas d'agir directement sur les bioagresseurs. Jusqu'à aujourd'hui, l'épidémiosurveillance est surtout utilisée pour la lutte chimique (par exemple, le franchissement d'un seuil d'un indicateur de risque lié à un bioagresseur déclenchant un traitement) et le biocontrôle, mais la démarche prospective vise à réfléchir aux modalités d'utilisation de l'épidémiosurveillance pour la prophylaxie.

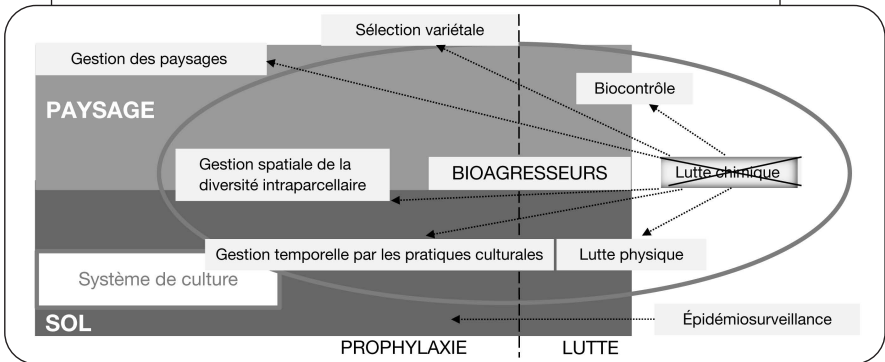
Les enjeux d'une protection des cultures sans pesticides chimiques

En s'inspirant de l'approche de l'innovation par retrait¹³ (Goulet et Vinck, 2012) et afin d'enclencher un raisonnement prospectif, la question suivante a été posée aux

13. Cette théorie a été développée pour décrire l'innovation des techniques du non-labour. On retient de Goulet et Vinck (2012) trois étapes de l'innovation (en faisant abstraction à ce stade du raisonnement prospectif des associations d'acteurs) : (i) la création d'associations centrifuges (quel est le problème de l'entité supprimée ? Pour le labour, cet acte technique diminue la vie biologique des sols et favorise l'érosion) ; (ii) la mise en visibilité d'autres entités (quand on supprime l'entité, est-ce qu'il y a des entités préexistantes, mais non visibles qui sont rendues visibles ? Il s'agit notamment du sol et de la vie biologique du sol dans le cas du non-labour) ; et (iii) l'association de nouvelles entités (la suppression de l'entité est possible grâce à l'introduction de nouveaux objets techniques : les semoirs et les herbicides pour le non-labour). Ce type d'innovation redéfinit les entités en présence et leurs interactions, et introduit un flou sur les frontières du réseau sociotechnique considéré (sur ce qui en fait ou non partie) ainsi que sur les catégories d'entités qu'il engage.

experts pour imaginer une protection des cultures sans pesticides chimiques : « lorsqu'on supprime la lutte chimique, que se passe-t-il dans la protection des cultures ? » La réflexion collective s'est appuyée sur la figure 2.2, qui est une représentation simplifiée du schéma précédent.

Figure 2.2. La mobilisation de l'approche de l'innovation par retrait pour imaginer une protection des cultures sans pesticides chimiques



Lorsque l'on supprime la lutte chimique de la protection des cultures et que l'on cherche à constituer une protection des cultures viable, plusieurs éléments se font jour et sont à prendre en considération.

Tout d'abord, la suppression de la lutte chimique entraîne des changements dans les autres modes d'action (flèches de la figure 2.2), notamment parce que les substitutions simples, termes à termes, d'un pesticide de synthèse par un mode d'action sont peu efficaces. Il s'agit plutôt de mettre en place une combinaison de plusieurs modes d'action afin d'obtenir un effet similaire.

Ensuite, la stratégie générale de protection des cultures ne peut pas, en l'absence de pesticides chimiques, s'appuyer uniquement sur des méthodes de contrôle des bioagresseurs. Elle doit se construire plus en amont, afin d'agir avant que le bioagresseur ne manifeste sa présence dans l'interaction avec la plante cultivée. Ainsi, le retrait des pesticides chimiques entraîne un basculement de la stratégie générale de protection des cultures d'une stratégie curative vers une stratégie prophylactique.

Enfin, comme les modes d'action sont pour une large part entièrement imbriqués dans le système de culture, le retrait des pesticides chimiques rend nécessaire la réarticulation des pratiques qui constituent le système de culture. Ainsi, du point de vue du système de culture, le retrait des pesticides chimiques nécessite une reconception du système de culture (Hill et McRae, 1995) pour mettre en cohérence les pratiques culturales et la protection des cultures.

Avec la diversité des modes d'action, de nouvelles entités apparaissent et sont mobilisées, par l'intermédiaire des processus biologiques, pour la régulation des bioagresseurs : ce sont le sol et le paysage. Pour ceux-ci, la biodiversité est un critère essentiel de la régulation biologique des bioagresseurs. Ainsi, la suppression de la lutte chimique questionne aussi ce que l'on entend par bioagresseur. Nous y reviendrons dans la sous-section suivante.

■ L'élaboration d'hypothèses de rupture pour une protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050

L'identification des hypothèses de rupture

Il ressort de l'exploration précédente, dont la démarche est inspirée de la théorie de l'innovation par retrait, que deux compartiments deviennent plus visibles dans le futur de la protection des cultures lorsque l'on supprime la lutte chimique. Ce sont le paysage et le sol.

Or, dans les approches de prospective, lorsque l'on envisage les futurs possibles d'un système, on est fréquemment amené à faire varier les frontières du système. L'enjeu de la réflexion prospective est alors de reconsidérer ce qui est interne et ce qui est externe, c'est-à-dire ce qui distingue le système et le contexte.

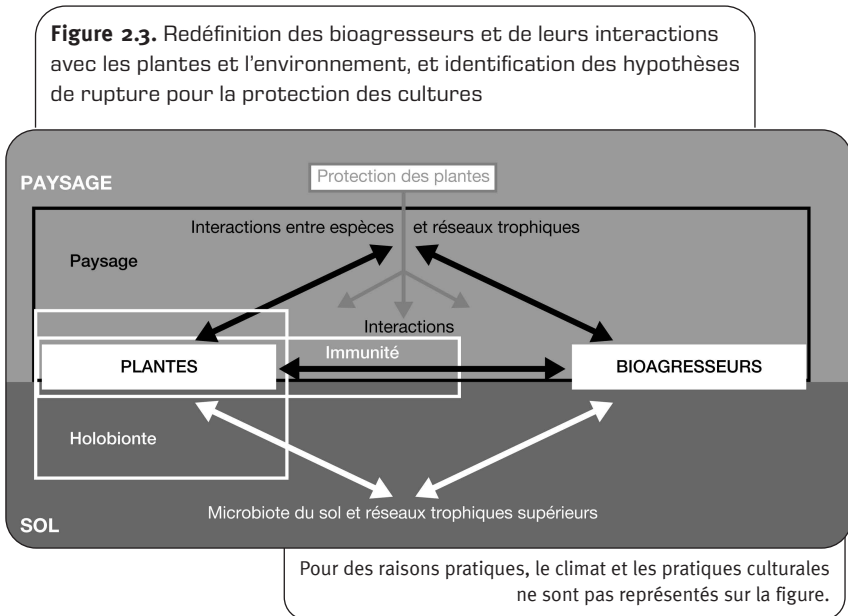
Les travaux de sociologie de l'innovation et de sociologie des réseaux sociotechniques insistent sur le fait que l'innovation constitue un moment d'incertitude, que les transformations d'un réseau sociotechnique génèrent un flou sur les frontières du réseau et mettent en mouvement les catégories d'acteurs et d'actants (Callon, 1986 ; Latour, 2014). Ainsi, la nature des entités en interaction à l'intérieur du réseau sociotechnique est modifiée par le retrait d'un élément. Le processus d'innovation met en mouvement des catégories entre la nature et la technique, entre le matériel et l'immatériel.

À partir du schéma sur les modes d'action (figure 2.1), la réflexion a d'abord porté sur la notion de bioagresseurs, conduisant à deux remarques préliminaires, détaillées ci-après.

- Les schémas classiques de protection des cultures, comme celui développé dans le schéma synthétique (figure 2.1), présentent les bioagresseurs en leur centre et décrivent les différents leviers pour agir sur ces bioagresseurs. Par rapport à cette conception, un premier déplacement conceptuel a été proposé. Au lieu de considérer que la protection des cultures vise à agir contre un bioagresseur, nous suggérons de considérer que la protection des cultures vise à agir sur les plantes, les bioagresseurs, ainsi que sur les interactions entre plantes et bioagresseurs.
- Une seconde remarque tient à la notion même de bioagresseurs. Une même espèce peut être à un moment donné considérée comme un bioagresseur du point de vue du système de culture, et ne plus l'être à un autre moment. Un exemple concernant les agents pathogènes est décrit par Méthot et Alizon (2014), et un autre concernant les adventices l'est par Bretagnolle et Gaba (2015). Cette espèce est toujours

un élément de l'écosystème et de la biodiversité, mais sans interaction directe spécifique avec la plante cultivée. Ainsi, le terme *bioagresseur* décrit un rôle assigné à une entité biologique en relation avec la plante cultivée.

À partir de ces réflexions, nous avons construit un diagramme conceptuel (figure 2.3) qui replace les interactions entre la plante cultivée et les bioagresseurs à l'intérieur de réseaux d'interactions plus larges au sein du paysage et du sol.



Sur la figure 2.3, le premier déplacement conceptuel concerne l'objet de la protection des cultures, il consiste à agir sur les interactions entre les plantes cultivées et les bioagresseurs. Le second déplacement concerne les plantes et les bioagresseurs qui sont intégrés dans des réseaux de relation au sein d'un paysage et d'un sol.

Les plantes cultivées sont en interaction à l'échelle du paysage avec d'autres espèces naturelles, et insérées dans des réseaux trophiques, et dans le sol. Elles sont en interaction avec les communautés microbiennes du sol, ainsi qu'avec des réseaux trophiques supérieurs (mésobionte et macrobionte). De la même manière, les bioagresseurs sont aussi en interaction avec d'autres espèces à l'échelle du paysage (au travers de réseaux trophiques) et dans le sol avec le microbiome et les réseaux trophiques supérieurs. On a ici un double triptyque d'interactions à l'intérieur du paysage et du sol.

En matérialisant ces interactions à différentes échelles (plante, sol, culture, paysage), ce diagramme conceptuel permet de visualiser les mécanismes d'interaction et les leviers potentiels pour la protection des cultures, en particulier ceux fondés sur les régulations biologiques au niveau du sol, de la parcelle et du paysage. Sur la base des trois axes qui se dégagent (figure 2.3), nous avons imaginé trois hypothèses de rupture dans la protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050 : (i) en agissant sur la relation entre la plante et les ravageurs, en particulier sur l'immunité des plantes (cadre central de la figure 2.3) ; (ii) en agissant sur la conception du paysage et les régulations biologiques à cette échelle (cadre supérieur de la figure 2.3) ; et (iii) en repensant la relation de la plante avec le microbiote, au travers de la perspective de l'holobionte, c'est-à-dire de la plante et de son cortège microbien (cadre inférieur de la figure 2.3).

Les hypothèses de rupture pour une protection des cultures sans pesticides chimiques

Afin de nous projeter en 2050, de tester et d'approfondir chaque hypothèse de rupture, nous avons posé aux experts plusieurs questions commençant par « et si ».

- Et si en 2050, on pouvait remodeler entièrement les paysages et les territoires, comment pourrait-on raisonner la protection des plantes ? Que signifie le fait de gérer la pression des bioagresseurs *via* la reconception des paysages ? Comment maîtriser la pression des bioagresseurs par l'organisation spatiale des paysages ?
- Et si en 2050, on pouvait agir sur les communautés microbiennes des sols et sur l'holobionte, comment serait redéfinie la protection des plantes ? Que pourrait être une protection des cultures basée sur l'holobionte ?
- Et si en 2050, on pouvait agir et renforcer l'immunité des plantes, qu'est-ce qu'une protection des cultures basée sur l'immunité des plantes ?

L'exploration des hypothèses de rupture s'est déclinée en trois points, détaillés ci-après.

- Imaginer l'hypothèse de rupture, les connaissances acquises en 2050 sur ce domaine particulier et leurs applications possibles ; donner corps à cette hypothèse.
- Comment mobiliser pleinement les effets de cette hypothèse pour la gestion des bioagresseurs ? Quelles conséquences possibles de cette hypothèse de rupture sur les autres modes d'action ?
- Quelle articulation de cette hypothèse avec d'autres modes d'action et le système de culture pour construire une protection des cultures efficace ?

Les résultats de cette démarche sont présentés ci-après.

Première hypothèse de rupture en 2050 : une diversification des paysages adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions

Pour protéger les cultures en 2050, l'hypothèse de rupture « Diversification des paysages adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions » mobilise des interactions dans l'espace et dans le temps au-delà de l'échelle de la parcelle. L'hypothèse consiste

à manipuler les régulations biologiques en favorisant la biodiversité et l'agrobiodiversité¹⁴. Elle ne se limite pas à des fins de protection des cultures. Elle obéit à des règles de suboptimalité et doit permettre la conservation d'organismes vivants ni « utiles » ni « nuisibles » aux cultures (Darnhofer *et al.*, 2008 ; Grumbach et Hamant, 2020). Elle intègre différentes échelles de gestion des bioagresseurs, depuis le paysage jusqu'à la parcelle, y compris l'échelle du système de culture. Elle suppose de considérer les paysages comme des interfaces entre les agroécosystèmes et les acteurs qui les structurent. Cette hypothèse de rupture s'appuie sur une diversification des paysages et des cultures, qui doit (i) être adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions et (ii) permettre de créer, en matière d'habitats et de ressources, des discontinuités pour les bioagresseurs et des continuités pour les auxiliaires et les autres organismes vivants (ni « utiles » ni « nuisibles »). Les paysages sont composés d'une matrice stable d'habitats naturels et semi-naturels et d'une mosaïque de cultures modifiable dans sa composition et sa configuration, selon les critères détaillés ci-après.

- Les habitats naturels et semi-naturels occupent 20 % de l'espace (Garibaldi *et al.*, 2021 ; Tscharncke *et al.*, 2021), et sont répartis régulièrement à l'intérieur des paysages. Ils incluent des espaces boisés et herbacés (prairies permanentes). Les habitats naturels et semi-naturels doivent rester naturels et semi-naturels. Leur diversité et leur antériorité ont un effet sur leur rôle dans les régulations biologiques.
- Les systèmes de culture sont diversifiés dans l'espace et dans le temps (systèmes agroforestiers, cultures associées, mélanges de variétés, populations, cultures multiples y compris cultures de couverture, rotations longues). Les pratiques culturales sont adaptées pour gérer les bioagresseurs (utilisation de stratégies *push-pull*, effet barrière des cultures, de compétition vis-à-vis des adventices, limitation des risques par la diversité des cycles et l'alternance de résistance, des variétés, etc.) et les inocula (dilution des ressources, délai de retour de la culture dans la rotation, etc.), tout en préservant les auxiliaires et autres organismes vivants.
- Les parcelles cultivées sont de taille réduite et bordées d'interfaces avec les habitats naturels et semi-naturels.

Dans cette hypothèse, des outils de surveillance des régulations biologiques doivent être développés pour éclairer, dans le temps, les décisions visant à protéger les cultures, et permettre une modification anticipée de la mosaïque de cultures. Ces outils prennent en compte les relations entre (i) des indicateurs sur la dynamique des bioagresseurs ; (ii) la composition, la configuration et les pratiques au sein de la mosaïque des cultures au cours des années précédentes et en cours d'année ; et (iii) le contexte climatique. De ce point de vue, un apprentissage est nécessaire sur

14. « La biodiversité agricole est un terme général qui englobe toutes les composantes de la diversité biologique pertinentes à l'alimentation et à l'agriculture, et toutes les composantes de la diversité biologique constituant les écosystèmes agricoles : la variété et la variabilité des animaux, des plantes et des micro-organismes, aux niveaux génétiques, des espèces et des écosystèmes, qui sont nécessaires au maintien des fonctions clés de l'agro-écosystème, à sa structure et à ses processus » (FAO, 2022a).

l'ensemble des interactions et transformations opérant à l'intérieur des paysages. De nouveaux seuils de « nuisibilité » jugés acceptables sont également définis.

Enfin, cette hypothèse de rupture suppose une coordination des pratiques des acteurs à l'intérieur des paysages et une gouvernance adaptée aux échelles de gestion des bioagresseurs qui peuvent varier dans le temps (réflexion à des échelles et avec des acteurs différents selon les années). Elle suppose une reconnaissance collective de la multifonctionnalité de l'agriculture et des services écosystémiques pour y adhérer.

Deuxième hypothèse de rupture en 2050 : un pilotage de l'holobionte en renforçant les interactions hôte-microbiotes

L'hypothèse de rupture « Pilotage de l'holobionte en renforçant les interactions hôte-microbiotes » mobilise les interactions hôte-microbiote afin de renforcer la protection de la plante cultivée face aux bioagresseurs en 2050. L'hypothèse consiste à piloter ou à orienter (suivant les versions de l'hypothèse) l'holobionte.

L'holobionte qui est un assemblage d'espèces comprenant des plantes cultivées et leurs communautés microbiennes associées forme une seule unité évolutive (Simon *et al.*, 2019). L'interaction hôte-microbiote fonctionne de la manière suivante. Pour répondre à ses besoins dans son environnement, la plante recrute des micro-organismes dans un réservoir de diversité microbienne (virus, bactéries, archées, protistes, champignons, principalement présents dans le sol), avec lesquels elle construit des relations stables qui peuvent être par exemple des relations symbiotiques, comme dans le cas des mycorhizes. L'objectif de la protection des cultures basée sur l'holobionte est de renforcer les fonctions du microbiote, de manière à améliorer la protection de la plante et sa résistance aux bioagresseurs, ainsi qu'à renforcer l'adaptabilité de l'holobionte (c'est-à-dire sa capacité à recruter des micro-organismes) face aux perturbations biotiques ou abiotiques. Pour ce faire, le développement d'actions très localisées et contextualisées sur le microbiote du sol est nécessaire, ainsi qu'une articulation complète avec le système de culture.

À cette fin, des outils de diagnostic des microbiotes (en particulier du microbiote du sol) doivent être développés d'ici 2050, et basés sur des indicateurs qui caractérisent l'état du microbiote et sa relation à la plante (Mocali *et al.*, 2008). De ce point de vue, les connaissances sur les micro-organismes constituant le microbiote sont à affiner d'ici 2050, notamment pour mieux comprendre les réservoirs de diversité microbienne (sol, air, adventices, eau, insectes) et préciser les manières de piloter ou de moduler ces réservoirs.

Plusieurs leviers d'action pour orienter le microbiote du sol, dont certains sont déjà utilisés, pourraient être systématisés ; notamment, une sélection variétale adaptée pour renforcer les interactions plante-microbiote (phénotype étendu), ou l'inoculation de micro-organismes clés pour moduler le microbiote (et par exemple, développer certains services écosystémiques de protection pour la plante). La sélection variétale devra également prendre en compte les caractéristiques d'un système de

culture à bas niveau d'intrants, car de hauts niveaux de fertilisation chimique sont défavorables au renforcement des interactions plante-microbiote (Wallenstein, 2017).

Les autres leviers pour piloter le microbiote concernent les pratiques culturales. Le travail du sol, les amendements organiques, la gestion des résidus, mais aussi le choix des cultures et des cultures de couverture permettent de moduler le microbiote en jouant sur les apports de micro-organismes (fumures) et sur la composition en micro-organismes du sol (sélection par les plantes cultivées ou les adventices, par la présence ou l'absence de résidus). Du fait de la sensibilité des micro-organismes du sol à la fertilisation chimique ainsi que du lien très fort existant entre des niveaux de fertilisation élevés et une importante présence de bioagresseurs, une réduction de la fertilisation chimique permet un renforcement des capacités de recrutement de la plante cultivée et une moindre virulence des bioagresseurs.

Le pilotage du microbiote du sol est à envisager par rapport au contexte local (microbiote local) du système de culture (travail du sol, amendements, etc.) afin d'éviter les incompatibilités au regard des objectifs. Ce pilotage nécessite un suivi continu du microbiote du sol à l'échelle de la parcelle, pour mesurer les effets au cours du temps du système de culture sur le microbiote ainsi que les conséquences des interventions ciblées visant à le moduler. De ce point de vue, certaines pratiques développées sur une base empirique visant à renforcer les capacités du sol, les sols suppressifs par exemple (Schlatter *et al.*, 2017), pourraient être réinvesties.

Dans cette hypothèse, il faut également prendre en compte la dimension multiservice du microbiote (nutrition de la plante, mycorhization, résistance aux stress et plasticité phénotypique) qui est aussi mobilisée dans le système de culture. Enfin, l'ensemble des holobiontes présents sur la parcelle jouent un rôle dans la protection des cultures, par exemple en contrôlant les ravageurs grâce à la favorisation des bactéries parasites du microbiote des insectes ravageurs.

Troisième hypothèse de rupture en 2050 : un renforcement de l'immunité des plantes cultivées directement et indirectement

Cette hypothèse de rupture repose sur le renforcement de l'immunité des plantes cultivées, de manière directe ou indirecte. Le renforcement direct de l'immunité des plantes peut s'effectuer par différents moyens, détaillés ci-après.

- Par la stimulation du système immunitaire. Soit grâce à l'apport exogène de produits stimulateurs des défenses des plantes (SDP), soit grâce à l'obtention de variétés de plantes produisant des SDP. L'apport exogène de SDP peut être associé à l'apport exogène de biostimulants afin d'atteindre un équilibre optimal entre les processus de défense et les processus de croissance de la plante, en recherchant des effets synergiques. Les SDP peuvent également être appliqués de manière préventive, ce qui est assimilable à un renforcement des mécanismes de défense des plantes (Desmedt *et al.*, 2021). Cependant, les effets négatifs de ces substances sur les plantes, leur environnement biotique (flore et faune) et abiotique, ainsi que sur les humains doivent

être étudiés. Ce levier est complémentaire du levier génétique qui fournit des variétés totalement ou partiellement résistantes. Il relâche la pression sur les gènes de résistance et retarde potentiellement le contournement de la résistance.

- Par le contrôle génétique. Premièrement en sélectionnant des génotypes résistants aux bioagresseurs (gènes de résistance majeurs et mineurs conférant une résistance totale ou partielle) et des porte-greffes pour les plantes pérennes. Ce levier présente une plus grande durabilité dans le temps que la stimulation directe du système immunitaire. Deuxièmement, jusqu'à présent, la sélection a été principalement réalisée par le biais d'une sélection « classique » utilisant le criblage phénotypique assisté par des outils moléculaires (pour tracer les gènes de résistance ou appliquer la sélection génomique) basés sur la variation naturelle. Le génie génétique (introduction de gènes par transgénése ou, plus récemment, édition du génome) est un moyen d'introduire ou de modifier des gènes afin d'imiter l'immunité développée par des espèces apparentées ou non (en particulier sauvages).

Le renforcement indirect de l'immunité des plantes consiste plutôt à ne pas perdre, ou du moins à maintenir, leur immunité génétique ou acquise. Il peut s'effectuer en favorisant différents éléments, détaillés ci-après.

- Les interactions positives entre les plantes et leur environnement immédiat :
 - En favorisant notamment les interactions biologiques qui renforcent la résistance des plantes.
 - En associant la prophylaxie à la qualité des différents microbiotes (endogènes à la plante, de la rhizosphère, de la phyllosphère).
 - En s'appuyant sur la compréhension et l'utilisation de la réponse des plantes aux stress multiples.
- Les interactions positives entre les plantes et leur environnement à des échelles spatiales et temporelles plus étendues (système de production, paysage, territoire) :
 - En anticipant et en imaginant à l'avance de nouvelles solutions (prophylactiques) pour agir sur l'immunité des plantes, dans un système capable d'évoluer et de s'ajuster en permanence à l'évolution des menaces. Cette anticipation nécessite de définir des indicateurs et des seuils d'immunité, ainsi que de les quantifier (niveau de protection de la plante à une attaque de bioagresseurs, indicateurs moléculaires, optiques, etc.) à partir notamment de dispositifs d'épidémiosurveillance (capteurs embarqués, technologies numériques, modèles d'assimilation de données, etc.).
 - Par la diversification des cultures, portant différents gènes de résistance grâce à l'introduction des mélanges d'espèces et de variétés, ou encore en pyramidant les gènes au sein d'une même variété.
 - En repensant l'implantation géographique des cultures et la spécialisation des zones de culture grâce à la sélection de variétés adaptées aux conditions agro-pédoclimatiques locales (itinéraire cultural, caractéristiques locales des sols et du climat) et à l'évolution du climat.

- En introduisant des plantes de service dans les successions culturales et dans les paysages : soit en couverture permanente du sol empêchant les adventices de se développer ; soit en compétition avec les adventices pour limiter leur accès aux ressources et ainsi leur développement ; soit en diffusant des « odeurs » dans le paysage par allélochimie ou encore en implantant les plantes de service à la périphérie d'une parcelle ayant un rôle de barrière physique et protégeant ainsi les plantes cultivées au centre de la parcelle ; soit, enfin, en favorisant les interactions positives plantes-insectes et plantes-plantes.
- En raisonnant les espèces, les variétés cultivées ou les plantes de service dans les parcelles et les paysages, et en repensant la configuration des parcelles et des paysages.

I Les stratégies de gestion des différentes catégories de bioagresseurs dans les systèmes sans pesticides chimiques en 2050

Cette sous-section détaille les stratégies de gestion sans pesticides chimiques de trois catégories de bioagresseurs : les adventices, les ravageurs et les pathogènes.

Les stratégies de gestion des adventices

Les adventices sont endogènes aux parcelles cultivées et font partie intégrante de la biodiversité des agroécosystèmes. Les trois grands stades de développement des adventices sont les semences dans le sol, les plantes germées et levées, et les graines produites et disséminées par voies naturelles (par exemple, par le vent ou le ruissellement) ou anthropiques (par exemple, par les matériels agricoles ou les animaux).

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour agir sur ces trois grands stades de développement afin de réduire la présence des adventices dans les parcelles cultivées et leur transfert dans les paysages. Trois stratégies principales ont été définies à partir de ces hypothèses pour agir sur les trois grands stades de développement (tableau 2.4) : (i) éliminer les adventices (avec la lutte), (ii) vivre avec les adventices en améliorant la compétitivité des plantes cultivées pour l'accès aux ressources ou en renforçant les processus naturels, et (iii) valoriser les services écosystémiques des adventices (par exemple, la biomasse fourragère).

Pour les adventices, les actions de lutte sont très difficiles à distinguer des actions prophylactiques. Par exemple, la suppression d'une plante adventice (lutte) entraîne l'absence de production de graines adventices (prophylaxie). Il est par ailleurs très difficile d'évaluer les pertes de rendement dues à la présence d'adventices, contrairement aux autres types de bioagresseurs (ravageurs, pathogènes) et de définir des seuils de nuisibilité des adventices. Le principe général de la lutte ou prophylaxie contre les adventices est de s'assurer que les plantes cultivées conservent une avance de développement sur les adventices.

Tableau 2.4. Stratégies de gestion des adventices pour une protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050

Stratégies Agir sur :	Éliminer les adventices	Limiter le développement des adventices	Mobiliser les services des adventices
Stock de semences (graines) dans le sol	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier le stock semencier grâce aux technologies numériques <i>Prophylaxie, épidémiosurveillance ou technologies numériques</i> Sol <ul style="list-style-type: none"> • Puis détruire le stock semencier <i>Prophylaxie, lutte physique ou contrôle cultural ou agroéquipements</i> Plante 	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en œuvre la lutte biologique par conservation • Favoriser la présence d'insectes et d'oiseaux Paysage <ul style="list-style-type: none"> • Moduler les équilibres microbiens du sol pour limiter la germination des semences Sol et plante <ul style="list-style-type: none"> • Anticiper la venue de certaines adventices <i>Épidémiosurveillance</i> • Implanter des couverts intermédiaires ou des plantes de services <i>Prophylaxie, contrôle cultural ou gestion temporelle</i> • Optimiser les dates et densités de semis des plantes cultivées ou les successions culturales Plante et paysage 	
Plante germée ou levée	<ul style="list-style-type: none"> • Désherber mécaniquement ou manuellement <i>Lutte physique ou agroéquipements</i> Plante et sol <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des produits de biocontrôle (biopesticides) <i>Biocontrôle</i> • Sélectionner des traits allélopathiques <i>Contrôle génétique</i> Plante 	<ul style="list-style-type: none"> • Sélectionner des traits de compétitivité : chimiques (hormonaux ou allélopathiques), phénotypiques (architecture aérienne ou racinaire), fonctionnels (par exemple, efficacité de l'utilisation de l'azote) <i>Contrôle génétique</i> • Désherber, écimer, utiliser des traines et des robots <i>Lutte physique, contrôle cultural ou technologies numériques</i> Plante et sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Vivre avec les adventices, accepter la diversité spécifique, intraparcellaire et temporelle, accepter la perte de rendement et de qualité des récoltes • Valoriser les deux couverts végétaux (cultures et adventices) et le rôle des plantes adventices dans la biodiversité <i>Contrôle cultural ou gestion temporelle</i>
Graine produite	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter les interventions agricoles • Laver le matériel agricole • Limiter les déplacements humains et animaux dans les parcelles <i>Agroéquipements</i> Paysage 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire l'apport extérieur de graines d'adventices (augmenter la pureté des lots de semences cultivées) • Réduire la dissémination des graines par la reconfiguration du paysage (implanter des haies) et la gestion du matériel agricole <i>Agroéquipements</i> Paysage 	<ul style="list-style-type: none"> • Valoriser le rôle des graines d'adventices pour la biodiversité (par exemple, nourrir les insectes et les oiseaux) • Implanter des haies servant de refuge aux insectes et aux oiseaux <i>Contrôle cultural ou gestion temporelle</i> Paysage

Hypothèses d'évolution pour une stratégie de gestion des adventices sans pesticides chimiques en croisant trois stratégies principales de gestion des adventices (en colonnes) avec les trois grands stades de développement des adventices (en lignes). Les *modes d'action sous-jacents* sont en caractères italiques et les **entités mobilisées** sont en caractères gras.

Les modes d'action alternatifs à la lutte chimique sont principalement les suivants. Les techniques de la lutte physique à mobiliser seraient le travail du sol (par exemple, hersage de précision, robots intelligents), la gestion des menues pailles, et le passage de « racourcisseurs » d'adventices (par exemple, écimeuses, traines). Les moyens de contrôle génétique concerneraient la sélection des plantes cultivées sur des traits de compétitivité chimique (allélopathie, allélochimie), physiologique (par exemple, architecture racinaire réduite et architecture aérienne développée avec un port foliaire étalé facilitant l'accès aux ressources lumineuses, vigueur en début de croissance) et fonctionnels (par exemple, efficacité d'utilisation des ressources captées). La gestion temporelle et le contrôle cultural sont aussi des leviers à mobiliser pour réduire le développement des adventices, la production de semences et ainsi le stock de semences dans le sol, grâce à des dates de semis optimales, une augmentation des densités de semis des plantes cultivées, un choix des types de plantes cultivées, un choix des rotations et des successions culturales, et une implantation de couverts intermédiaires qui pourraient même être des couverts adventices. Enfin, le biocontrôle peut être mobilisé en utilisant des insectes ou des pathogènes qui se développent sur les adventices.

La gestion du sol est un levier majeur, car le sol est le réservoir des semences adventices. L'amélioration des connaissances (encore anecdotiques) concernant le microbiote des semences adventices pourrait permettre d'améliorer la gestion du sol. Le travail de celui-ci permettrait de réduire le stock semencier d'adventices du sol, mais pourrait aussi entraîner des problèmes (par exemple, coût, dégradation des sols). Il serait aussi important d'augmenter la pureté des lots de semences cultivées afin de ne pas importer de nouvelles adventices.

Le levier de la gestion des paysages semble peu mobilisable, car les adventices sont majoritairement indigènes, le plus souvent endocycliques, c'est-à-dire fortement impactées par l'histoire des parcelles cultivées, contrairement à certains ravageurs animaux et pathogènes végétaux (mobiles). Néanmoins, il y a quelques pistes à explorer. La première consiste à gérer la taille des parcelles cultivées de manière à réduire la diversité intraparcélaire des populations adventices et augmenter ainsi l'efficacité des autres moyens de lutte. La deuxième consiste à planter des bandes de cultures différentes afin de réduire la dissémination des adventices. La troisième consiste à imaginer des structures paysagères qui permettraient d'accueillir des oiseaux et des insectes qui se nourriraient de graines ou de plantules adventices, constituant ainsi une forme de lutte biologique. Cependant, la suppression des adventices pourrait entraîner la disparition de certains oiseaux et insectes, modifiant ainsi les cycles des autres communautés biologiques ; dans ce cas, la suppression des adventices pourrait devenir une action négative pour la gestion des agroécosystèmes.

L'épidémiosurveillance pourrait aussi contribuer à la lutte contre les adventices. Par exemple, une meilleure connaissance (quantité, localisation) des stocks de semences adventices dans les sols ainsi que de la flore en place pourrait permettre de réduire le stock semencier en place et aussi d'identifier les cultures à éviter pendant plusieurs

années, car favorisant le développement de certaines adventices. Des agroéquipements (par exemple, caméras, robots) et des technologies numériques (par exemple, traitement de l'information) seraient alors à développer pour échantillonner les stocks et les compositions de semences adventices dans les sols (forme de biovigilance), séquencer leur ADN, détecter la présence, l'absence, voire la quantité des espèces de semences adventices nuisibles aux plantes cultivées, puis cibler leur destruction. Des stratégies collectives pourraient se mettre en place pour limiter le transport de semences d'adventices par le matériel agricole (y compris le lavage du matériel) ou le commerce (y compris le passeport phytosanitaire au niveau national et le certificat au niveau international, basé sur l'inspection des lots de semences et de la production de semences au champ), ainsi que pour éradiquer ou limiter les risques de développement de nouvelles espèces invasives toxiques et allergisantes (par exemple, le datura et l'ambrosie commune).

Les stratégies de gestion des ravageurs

Trois types de systèmes de culture et de stratégies possibles pour protéger les cultures des ravageurs ont été envisagés (tableau 2.5).

- Éliminer les ravageurs en substituant la lutte chimique par le biocontrôle. Cette stratégie de protection n'implique pas de changements majeurs dans les systèmes de culture actuels. Le contrôle génétique peut être mobilisé pour améliorer les résistances variétales quand elles sont disponibles. La lutte physique peut être mise en œuvre pour faire barrière aux ravageurs (par exemple, par l'usage de filets).
- Isoler les cultures des ravageurs en les cultivant dans des conditions d'environnement contrôlé à l'intérieur d'installations appropriées. Cette stratégie de protection est associée à une maîtrise des flux entrant et sortant du système de culture. Elle pose des questions de viabilité économique et énergétique, de pollution par les plastiques, et de disponibilité des matériaux à l'horizon 2050.
- Influencer la dynamique des populations de ravageurs par le biais de régulations biologiques en augmentant la biodiversité et l'agrobiodiversité du paysage à la parcelle. Cette stratégie de protection nécessite une diversification des paysages et des cultures qui permet de créer, en matière d'habitats et de ressources, des discontinuités pour les ravageurs (et autres bioagresseurs) et des continuités pour les auxiliaires et autres organismes vivants (non considérés comme bioagresseurs), et qui est adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions. Dans cette hypothèse, les paysages sont composés d'une matrice stable d'habitats naturels et semi-naturels et d'une mosaïque de cultures modifiable dans sa composition et sa configuration. La taille des parcelles cultivées est réduite. Les systèmes de culture sont diversifiés dans l'espace et dans le temps (systèmes agroforestiers, cultures associées, mélanges de variétés, populations, cultures multiples, rotations longues) ; et leurs itinéraires techniques (par exemple, grâce au broyage, à l'enfouissement, ou au pâturage des résidus) sont adaptés pour gérer au mieux les inocula, tout en préservant les auxiliaires et autres organismes vivants (non considérés comme bioagresseurs). Les variétés et populations sont sélectionnées dans

un objectif de diversification des cultures (par exemple, pour favoriser les interactions plante-plante) et de mise en œuvre d'autres pratiques préventives de protection des cultures. L'usage de barrières physiques aux ravageurs (par exemple, de filets) peut s'avérer nécessaire, notamment pour les cultures pérennes. En dernier ressort ou transitoirement, lorsque la prophylaxie échoue, le biocontrôle peut être utilisé pour réduire les populations de ravageurs. Les ravageurs pourraient aussi être prélevés manuellement ou mécaniquement pour un usage alimentaire.

Une meilleure connaissance et surveillance du cycle de vie des ravageurs et des réseaux trophiques à l'échelle des paysages est nécessaire pour éclairer les décisions stratégiques et tactiques de pilotage des régulations biologiques. Les seuils de nuisibilité doivent être redéfinis et des pertes de récoltes en quantité et qualité acceptées.

Tableau 2.5. Stratégies de gestion des ravageurs pour une protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050

Stratégie	Éliminer les ravageurs (lutte)	Isoler les cultures des ravageurs (lutte)	Agir sur la dynamique des ravageurs (prophylaxie)
Principal levier d'action	Substitution de la lutte chimique par le biocontrôle pour éliminer les ravageurs	Soustraction des cultures aux conditions réelles du milieu par le recours à la lutte physique pour faire barrière aux ravageurs et mettre les cultures sous cloche	Influencer la dynamique des ravageurs au moyen de régulations biologiques en favorisant la biodiversité et l'agrobiodiversité depuis l'échelle du paysage jusqu'à l'échelle de la parcelle (diversification des paysages et des cultures)
Mode(s) d'action complémentaire(s)	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle génétique (résistances variétales) • Lutte physique (filets) 		<ul style="list-style-type: none"> • Pratiques culturales (gestion des inocula) • Contrôle génétique (variétés et populations sélectionnées pour la diversification et la mise en œuvre d'autres pratiques préventives) • Lutte physique (filets pour les cultures pérennes) • En dernier ressort, biocontrôle (notamment pour les cultures pérennes)
Corollaires	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de changement majeur dans les systèmes de culture 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle des flux entrant et sortant du système de culture • Accessibilité économique et énergétique, disponibilité des matériaux et limitation de l'usage des plastiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleures connaissances et suivi du cycle de vie des bioagresseurs et des réseaux trophiques à l'échelle du paysage, pour informer les décisions tactiques et stratégiques visant à influencer les régulations biologiques • Redéfinir les seuils de dommage et de perte de récolte acceptables en matière de qualité et de quantité

Les stratégies de gestion des pathogènes

Quatre stratégies de gestion des pathogènes sans pesticides chimiques ont été identifiées (tableau 2.6).

La stratégie de gestion « Ne rien faire en lutte » repose entièrement sur la prophylaxie. Cette stratégie de gestion est renforcée par la sélection de variétés et de porte-greffes moins sensibles, adaptés au contexte agronomique de la parcelle, de semences ou de plants dotés d'un microbiote protecteur, ainsi que par le choix de la parcelle. L'accent est également mis sur le choix de mélanges de variétés, d'association de cultures et de couverts végétaux défavorables aux pathogènes, la prise en compte du rôle des arthropodes dans le choix des variétés, l'accroissement de la biodiversité du sol, et l'inoculation d'un microbiote protecteur. L'acceptation de produits avec des défauts par le consommateur permettra de consolider cette stratégie de gestion.

Dans la stratégie de gestion « S'isoler du milieu », le milieu de culture est isolé du milieu naturel, les plantes sont cultivées sous serre. Cette stratégie de gestion est renforcée par la sélection de variétés et de porte-greffes adaptés à la culture sous serre. L'accent est mis sur les semences et les plants, qui doivent être initialement sains, afin d'éviter l'introduction d'inoculum dans le milieu, ainsi que sur l'inoculation avec un microbiote protecteur. La stratégie de gestion passe également par le contrôle des éléments introduits dans le système fermé, ainsi que par la surveillance de la propagation d'inoculum par l'intermédiaire des eaux d'irrigation, des machines et des personnes. Un suivi fin de l'état physiologique des plantes et du sol tout au long du cycle cultural permet de consolider cette stratégie de gestion. Un microclimat précisément ajusté (température et humidité) est également un puissant levier de cette stratégie.

La stratégie de gestion « Maîtriser le cycle des pathogènes » s'appuie sur des leviers comme la sélection de variétés et de porte-greffes moins sensibles, et des semences ou des plants dotés d'un microbiote protecteur. L'accent est également mis sur le choix de mélanges de variétés et de couverts végétaux défavorables aux pathogènes, la densité de semis pour créer des conditions abiotiques défavorables aux pathogènes, la gestion de la fertilisation, le raisonnement des rotations, et la mise en place de paysages suppressifs (paysages défavorables au développement de maladies). La stratégie de gestion est renforcée par la surveillance de la propagation d'inoculum par l'intermédiaire des eaux d'irrigation, de l'agressivité des pathogènes ainsi que de leur dispersion. Un suivi fin de l'état physiologique des plantes et du sol tout au long du cycle cultural et une approche systémique de l'immunité des plantes permettent de consolider cette stratégie de gestion.

La dernière stratégie de gestion, « Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes », s'appuie sur des leviers comme la sélection de variétés et de porte-greffes moins sensibles et pour de nouveaux usages (réponse aux stimulateurs de défense des plantes, architectures défavorables aux pathogènes, plantes de service, etc.), ainsi que la sélection de semences ou plants dotés d'un microbiote protecteur. L'accent est mis sur l'usage de stimulateurs de défense des plantes, et l'inoculation d'antagonistes des pathogènes.

Tableau 2.6. Stratégies de gestion des pathogènes pour une protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050

Stratégie de gestion	Ne rien faire en lutte (prophylaxie)	S'isoler du milieu	Maîtriser le cycle des pathogènes	Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes
Sélection	Variétés et porte-greffes moins sensibles, semences et plants dotés d'un microbiote indigène protecteur Immunité agroécologique	Variétés et porte-greffes sélectionnés pour la culture sous serre	Variétés et porte-greffes moins sensibles, semences ou plants dotés d'un microbiote indigène protecteur	Variétés et porte-greffes moins sensibles et pour de nouveaux usages, semences et plants dotés d'un microbiote indigène protecteur
Contrôle cultural	Mélanges variétaux Couverts végétaux Microbiote indigène sélectionné ou inoculé Rôle des arthropodes		Mélanges variétaux Couverts végétaux Densité de semis Fertilisation et rotations Paysages suppressifs	Défenses des plantes au niveau foliaire et sol Densité de semis Mélanges variétaux
Semences et plants, sol ou microbiote	Biodiversité du sol au sens large (cercle vertueux des réseaux trophiques, plus stables dans le temps ; davantage de biomasse)	Taxons du core microbiote antagonistes des pathogènes Semences et plants sains, microbiote protecteur	Taxons du « core » microbiote ¹⁵ antagonistes des pathogènes Semences et plants sains, inoculés avec un microbiote protecteur Biocontrôle microbien du sol	Favorisation de la biodiversité du sol pour renforcer la défense des plantes Accroissement de la diversité biologique du microbiote du sol
Actions de lutte			Phages spécifiques Taxons microbiens antagonistes Biocontrôle Entomovection	Stimulateurs de défense des plantes Inoculations ponctuelles d'antagonistes
Autres	Acceptation des produits avec des défauts aux consommateurs Choix du site à cultiver	Contrôle des éléments introduits Suivi fin des plantes et du sol Surveillance de la présence d'inoculum (eaux d'irrigation, machines, personnes)	Seuils d'intervention Suivi fin des plantes et du sol Surveillance de la présence d'inoculum (eaux d'irrigation), de l'agressivité et de la dispersion des pathogènes Approche systémique	Équilibre entre croissance, rendement et défense contre les bioagresseurs Suivi fin de l'état physiologique des plantes et du sol tout au long du cycle cultural

15. Le «core» microbiote désigne une communauté microbienne qui est systématiquement associée à une plante hôte.

Cette stratégie de gestion passe aussi par le choix de mélanges de variétés et de densités de semis favorables aux défenses de la plante. Un suivi fin de l'état physiologique des plantes et du sol tout au long du cycle cultural permet de consolider cette stratégie de gestion.

■ Les microscénarios des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050

La construction des microscénarios de systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050 est basée sur un tableau morphologique (tableau 2.7) qui regroupe les hypothèses d'évolution de la protection des cultures en 2050.

La construction des systèmes de culture en 2050 tient compte de diverses dimensions liées à la protection des cultures, telles que les stratégies de gestion des rava-

Tableau 2.7. Tableau morphologique pour la construction des microscénarios des systèmes de culture sans pesticides chimiques

Hypothèses d'évolution en 2050				
Une protection des cultures centrée sur :	Diversification des paysages	Gestion de l'holobionte	Renforcement de l'immunité des plantes	
Stratégie de gestion des ravageurs	Éliminer les ravageurs (lutte)	Isoler les cultures des ravageurs	Agir sur la dynamique des ravageurs (prophylaxie et lutte)	
Stratégie de gestion des adventices	Éliminer les adventices (lutte)	Limiter le développement d'adventices (prophylaxie et lutte)	Mobiliser les services des adventices (prophylaxie et services)	
Stratégie de gestion des pathogènes	Ne rien faire en lutte (prophylaxie)	S'isoler du milieu	Maîtriser le cycle des pathogènes	Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes

geurs, des adventices et des pathogènes, qui participent à la mise en œuvre de ces stratégies. En outre, d'autres dimensions contextuelles qui déterminent le système de culture, telles que l'agroéquipement et les technologies numériques ou l'action collective, ont été traitées séparément.

Le tableau morphologique a été construit en appliquant, pour chaque dimension du système, les hypothèses d'évolution de la protection des cultures précédemment construites. Sur chaque ligne figurent des hypothèses alternatives *a priori* décrivant les différentes évolutions possibles de la gestion des ravageurs, des adventices et des pathogènes à l'horizon 2050. Le tableau a été complété par une première ligne

avec les trois hypothèses de rupture pour la protection des cultures sur lesquelles nous avons travaillé. Nous avons considéré que chaque hypothèse de rupture était capable de générer un microscénario de système de culture en 2050.

Microscénario 1 : concevoir des paysages complexes et diversifiés adaptés aux conditions locales et à leurs évolutions

Ce microscénario est basé sur l'hypothèse de rupture « Diversification des paysages adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions » (tableau 2.8).

La protection des cultures en 2050 repose sur la prophylaxie. Le pilotage des régulations biologiques et la gestion des bioagresseurs s'appuient sur la biodiversité et l'agrobiodiversité de l'échelle du paysage jusqu'à la parcelle. Dans cette hypothèse de rupture, les méthodes de lutte ne sont utilisées qu'en dernier ressort ou transitoirement. En ce sens, les hypothèses d'évolution (i) « Éliminer les ravageurs » et « Isoler les cultures des ravageurs », (ii) « Éliminer les adventices » et (iii) « S'isoler du milieu » (pour la gestion des pathogènes) sont apparues incohérentes avec l'hypothèse de rupture « Diversification des paysages » (tableau 2.8). La présence des ravageurs est nécessaire au maintien d'une population d'auxiliaires. La conservation d'adventices ni « utiles » ni « nuisibles » doit être permise afin de maintenir une biodiversité à l'échelle du paysage.

Les stratégies de gestion des ravageurs, adventices et pathogènes

Les stratégies de gestion « Agir sur la dynamique des ravageurs » et « Ne rien faire en lutte contre les pathogènes » qui reposent sur la prophylaxie, sont apparues cohérentes avec une approche de diversification des paysages. Ces stratégies impliquent de reconsidérer les seuils de « nuisibilité » et d'étaler les risques de « nuisibilité ». Elles impliquent également d'acquérir de nouvelles connaissances sur les cycles des ravageurs et des pathogènes, ainsi que sur les régulations biologiques, pour éclairer les décisions de prophylaxie.

La stratégie de gestion des adventices a davantage été discutée dans la mesure où l'hypothèse « Mobiliser les services des adventices » a été interprétée comme modifiant le statut des adventices qui deviendraient des cultures de services, et où l'hypothèse « Limiter le développement d'adventices » a été interprétée comme n'envisageant pas la conservation d'adventices « utiles » dans les régulations biologiques (ou relativement à la fourniture d'autres services) et la conservation d'adventices ni « utiles » ni « nuisibles », qui font partie intégrante de la biodiversité. Dans ce microscénario, le développement des adventices doit être géré pour trouver un compromis entre les pertes de récoltes et les services rendus à l'échelle du paysage, tout en acceptant la présence d'adventices qui n'affectent pas les récoltes sans rendre de services. En ce sens, dans ce microscénario, la stratégie de gestion des adventices est une stratégie de gestion et de valorisation du développement des adventices.

Autres éléments contribuant au microscénario

Dans ce microscénario, une mutualisation des agroéquipements pourrait être mobilisée pour la protection des cultures à l'échelle des paysages. Il a toutefois été précisé que tous les équipements, capteurs et données ne sont pas mis en commun, que certains équipements sont modulaires afin de s'adapter aux spécificités des itinéraires techniques, et que dans une certaine mesure, l'automatisation et les robots pourraient faire partie des équipements utilisés. Dans ce microscénario, trois formes de mutualisation ont été distinguées : la mutualisation pour partager les investissements, la mutualisation pour coordonner les observations, et la mutualisation pour coordonner les actions sur les régulations biologiques.

Le microscénario basé sur la diversification des paysages s'appuie sur une diversification des paysages et des cultures, adaptée aux conditions locales (relocalisation des cultures et de l'élevage ; économie de gamme *versus* économie d'échelle). Il nécessite une forte coordination des acteurs des systèmes agrialimentaires pour avoir une réflexion générale et cohérente sur le partage des risques et des bénéfices à l'échelle du paysage. Il suppose une reconnaissance collective de la multifonctionnalité de l'agriculture et des services écosystémiques pour y adhérer. Il pose des questions de gouvernance territoriale : qui participe à l'élaboration des assolements et à la reconception des paysages ? Est-ce que les droits de propriétés (*usus, fructus, abusus*) des terres agricoles devront être revisités ?

Tableau 2.8. Le microscénario d'évolution « Concevoir des paysages complexes et diversifiés adaptés aux conditions locales et à leurs évolutions »

Hypothèses d'évolution en 2050				
Une protection des cultures centrée sur :	Diversification des paysages	Gestion de l'holobionte	Renforcement de l'immunité des plantes	
Stratégie de gestion des ravageurs	Éliminer les ravageurs (lutte)	Isoler les cultures des ravageurs	Agir sur la dynamique des ravageurs (prophylaxie et lutte)	
Stratégie de gestion des adventices	Éliminer les adventices (lutte)	Limiter le développement d'adventices (prophylaxie et lutte)	Mobiliser les services des adventices (prophylaxie et services)	
Stratégie de gestion des pathogènes	Ne rien faire en lutte (prophylaxie)	S'isoler du milieu	Maîtriser le cycle des pathogènes	Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes

Les hypothèses sélectionnées dans le microscénario apparaissent en grisé.

Microscénario 2 : gérer l'holobionte des cultures en renforçant les interactions hôte-microbiote

La construction de ce microscénario est basée sur l'hypothèse de rupture « Gestion de l'holobionte en renforçant les interactions hôte-microbiote » (tableau 2.9).

En 2050, la gestion de l'holobionte et du microbiote est considérée comme une hypothèse motrice qui a radicalement transformé la protection des cultures en permettant de se passer de pesticides chimiques.

Deux microscénarios possibles et divergents ont été identifiés et se différencient par leur degré de contrôle de l'holobionte et leur rapport à la biodiversité microbienne. Il a été choisi de travailler sur la gestion de l'holobionte en modulant la biodiversité du microbiome existant dans une stratégie systémique, intégrative et historique (gestion de la diversité du sol basée sur des indicateurs). Une autre stratégie de gestion consistant à gérer (au sens de concevoir) l'holobionte en reconfigurant le microbiome par des inoculations de micro-organismes (intrants commerciaux et inocula) et en modifiant l'hôte aurait pu être envisagée, mais elle a été jugée trop proche de l'approche du troisième microscénario.

Les stratégies de gestion des ravageurs, adventices et pathogènes

La stratégie de gestion des ravageurs consiste à « Agir sur les dynamiques des populations de ravageurs » en modifiant les microbiotes des ravageurs, notamment par l'inoculation de micro-organismes agissant sur l'holobionte des ravageurs, tels que des pathogènes ou des micro-organismes perturbant la reproduction ou la nutrition ou par des pratiques agricoles favorisant ces micro-organismes. Il s'agit aussi de mobiliser des micro-organismes synthétisant des composés organiques volatils pouvant perturber la perception ou la reconnaissance des ravageurs (correspondant à des stratégies de confusion).

Dans ce microscénario, la stratégie de gestion des adventices associe des stratégies visant à « Limiter les adventices » et à « Mobiliser les services des adventices ». Dans le premier cas, on cherche à renforcer le microbiote de la plante cultivée (qui favorise l'implantation, la germination et l'acquisition des nutriments par la plante) afin de la rendre plus compétitive par rapport aux adventices. Mais on peut jouer également sur les effets d'allélopathie liés aux micro-organismes du sol. Dans le second cas, on favorise grâce à un couvert végétal d'adventices le renforcement d'un réservoir de biodiversité microbienne qui est bénéfique pour la plante cultivée, notamment face à des perturbations biotiques ou abiotiques. La biodiversité du microbiome et les services écosystémiques du microbiome sont notamment pilotés à travers les rotations des cultures.

Enfin, la stratégie de gestion des pathogènes mobilise directement les capacités de l'holobionte et du microbiome à gérer les agents pathogènes, ce qui correspond à l'hypothèse « Maîtriser le cycle des pathogènes ». On utilise alors la compétition au sein du microbiome entre les pathogènes et les micro-organismes qui partagent les mêmes niches du microbiome, afin de protéger la plante en empêchant les pathogènes de s'implanter. De plus, l'interaction plantes-micro-organismes peut modifier le niveau

de défense des plantes et, en renforçant les interactions avec les micro-organismes (par inoculation directe ou par l'intermédiaire des semences, par une sélection d'associations semences-microbiote, ou par des stimulateurs de défense des plantes), leur permettre de mieux réagir à des attaques de pathogènes.

Autres éléments contribuant au microscénario

La stratégie de protection des plantes dans ce microscénario pourrait s'appuyer sur (i) des agroéquipements permettant de contrôler les adventices et les ravageurs au travers du système de culture pour orienter l'holobionte, ainsi que sur (ii) des agroéquipements (robots et pulvérisateurs) visant l'inoculation ciblée de micro-organismes. De manière générale, cette stratégie nécessite de disposer d'outils de diagnostic du microbiome présent dans la parcelle (et des microbiomes en général) tels que des instruments mutualisés de proxydétection afin de détecter la présence de symptômes sur les plantes, mais aussi d'anticiper le développement des pathogènes par un suivi de la diversité microbienne du sol. Ces outils de diagnostic des micro-organismes présents dans le microbiome du sol impliquent un raisonnement plus systémique du système de culture. Il s'agit d'anticiper la présence de micro-organismes favorables ou défavorables aux successions culturales qu'on envisage, à partir de la connaissance de l'état et de l'historique du microbiome du sol, du système de culture et de la fertilité des sols. Au travers de dispositifs d'apprentissage permettant de maîtriser ces nouveaux outils parmi des groupes d'agriculteurs, ces derniers pourraient constituer collectivement un savoir-faire pour interpréter les données et concevoir *in situ* des stratégies de gestion de l'holobionte.

Tableau 2.9. Le microscénario d'évolution « Gérer l'holobionte des cultures en renforçant les interactions hôte-microbiote »

Hypothèses d'évolution en 2050				
Une protection des cultures centrée sur :	Diversification des paysages	Gestion de l'holobionte	Renforcement de l'immunité des plantes	
Stratégie de gestion des ravageurs	Éliminer les ravageurs (lutte)	Isoler les cultures des ravageurs	Agir sur la dynamique des ravageurs (prophylaxie + lutte)	
Stratégie de gestion des adventices	Éliminer les adventices (lutte)	Limiter le développement d'adventices (prophylaxie et lutte)	Mobiliser les services des adventices (prophylaxie et services)	
Stratégie de gestion des pathogènes	Ne rien faire en lutte (prophylaxie)	S'isoler du milieu	Maîtriser le cycle des pathogènes	Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes

Les hypothèses sélectionnées dans le microscénario apparaissent en grisé.

Microscénario 3 : renforcer l'immunité des plantes cultivées

Le troisième microscénario est basé sur l'hypothèse de rupture « Renforcement de l'immunité de la plante cultivée directement et indirectement » (tableau 2.10).

Les stratégies de gestion des ravageurs, adventices et pathogènes

Dans ce microscénario, il apparaît *a priori* impossible d'« Éliminer tous les ravageurs » ou d'« Isoler les cultures des ravageurs » pour renforcer l'immunité des plantes. La stratégie « Agir sur la dynamique des ravageurs » a été retenue en priorité, ce qui soulève la question du seuil d'immunité des plantes et du nombre de ravageurs lors de l'installation des plantes cultivées. En effet, si le nombre initial de ravageurs est trop élevé, les plantes peuvent perdre leur immunité après un dépassement du seuil d'immunité ou un contournement de la résistance des plantes par les ravageurs.

Pour mieux gérer et renforcer l'immunité des plantes, il est primordial de pouvoir maîtriser la taille initiale de la population de ravageurs par des actions prophylactiques, en particulier en mettant en place des stratégies de protection des cultures agroécologique, ou par des méthodes de biocontrôle ou encore par allélochimie (par exemple, émissions de COV pouvant aller jusqu'à la création de paysages olfactifs) dont les processus sont encore mal connus. L'immunité des plantes pourrait aussi être renforcée indirectement, par exemple en contrôlant la dynamique de population des ravageurs ou en composant des paysages défavorables à l'installation des ravageurs.

De même que pour les ravageurs, la stratégie « Éliminer les adventices » ne paraît pas envisageable pour renforcer l'immunité des plantes. La stratégie « Mobiliser les services des adventices » a été retenue en priorité, notamment (i) en mettant en place des systèmes de culture incluant des couverts plurispécifiques, (ii) en utilisant les couverts adventices en tant que couverts intermédiaires, pour la production de fourrages ou encore en tant que refuges pour les auxiliaires des cultures, (iii) en favorisant l'usage des graines d'adventices comme nourriture pour les insectes et les oiseaux, (iv) en favorisant les interactions positives entre les plantes cultivées et les adventices, notamment par allélopathie, ou encore (v) en introduisant des antagonistes microbiens sur les adventices pour servir d'inoculum primaire et lutter contre les pathogènes.

La stratégie « Limiter le développement d'adventices » a aussi été retenue. Sa mise en œuvre consisterait : (i) à favoriser les interactions négatives (encore mal connues) des plantes cultivées sur les adventices par allélopathie et allélochimie (par exemple, la production d'exsudats racinaires contenant des molécules toxiques pour les adventices, de manière similaire aux effets des émissions de COV sur les ravageurs) et (ii) à préserver l'avantage compétitif des plantes cultivées pour leur accès aux ressources (par exemple, la lumière, les nutriments). Ces deux dernières modalités, avec des finalités différentes (mobiliser *versus* limiter), nécessitent de changer de paradigme et d'accepter de vivre avec les adventices, qui sont endogènes aux parcelles cultivées.

Les quatre stratégies proposées pour la gestion des pathogènes sont compatibles avec un renforcement de l'immunité des plantes, avec une légère préférence pour « Renforcer la capacité des plantes à lutter contre les pathogènes », notamment en cherchant à éviter la présence d'inocula dans les cultures, ceci en empêchant la reproduction sexuée des pathogènes (sur laquelle les connaissances restent encore peu nombreuses en comparaison de celles acquises sur les phases asexuées du cycle).

Autres éléments contribuant au microscénario

Le renforcement des capacités immunitaires des plantes pour lutter contre les pathogènes (et aussi contre les ravageurs et les adventices) pourrait s'effectuer par (i) la sélection classique par les phénotypes ou la sélection assistée par marqueurs (sélection génomique) pour intégrer de nouvelles sources de résistance dans les nouvelles variétés, (ii) l'édition génomique des plantes cultivées qui leur permettrait de produire des toxines à partir d'un ou plusieurs de leurs gènes, ceci en utilisant toute la palette des techniques de sélection (par exemple, CRISPR-Cas et les croisements) sans se focaliser uniquement sur les organismes génétiquement modifiés (OGM), (iii) des stimulations extérieures (stimulateurs de défense des plantes, biostimulants) ou des stimulations de la résistance variétale en utilisant les techniques d'amélioration variétale classique.

Les agroéquipements et les technologies numériques, sans avoir de lien direct avec l'immunité des plantes, pourraient contribuer à la renforcer directement, par exemple par l'apport de stimulateurs de défense des plantes ou de produits de biocontrôle, ou indirectement en agissant sur l'environnement biotique et abiotique des plantes cultivées. Des agroéquipements de précision et des technologies numériques seront nécessaires pour (i) surveiller et diagnostiquer la présence de bioagresseurs et le statut immunitaire des plantes, à l'aide de capteurs variés (embarqués ou au sol) collectant avec précision un grand nombre de données hétérogènes (par exemple, l'état physiologique des plantes, les caractéristiques des sols et les conditions météorologiques) et (ii) agir rapidement et localement, par exemple par des apports ciblés de stimulateurs de défense des plantes à l'aide d'essais de petits robots pouvant se déplacer en continu sur des microparcelles (au lieu d'utiliser un nombre limité de gros agroéquipements). Au-delà de leurs aspects positifs, ces logiques d'évolution des agroéquipements peuvent aussi avoir des effets négatifs sur les plantes, l'environnement, les animaux et les humains qui restent à évaluer (par exemple, l'émission de nanoparticules toxiques pour les plantes cultivées notamment, la consommation énergétique liée à l'acquisition de grandes quantités de données, le bilan carbone défavorable, les risques des robots autonomes).

Tableau 2.10. Le microscénario d'évolution « Renforcer l'immunité des plantes cultivées »

Hypothèses d'évolution en 2050				
Une protection des cultures centrée sur :	Diversification des paysages	Gestion de l'holobionte	Renforcement de l'immunité des plantes	
Stratégie de gestion des ravageurs	Éliminer les ravageurs (lutte)	Isoler les cultures des ravageurs	Agir sur la dynamique des ravageurs (prophylaxie et lutte)	
Stratégie de gestion des adventices	Éliminer les adventices (lutte)	Limiter le développement d'adventices (prophylaxie et lutte)	Mobiliser les services des adventices (prophylaxie et services)	
Stratégie de gestion des pathogènes	Ne rien faire en lutte (prophylaxie)	S'isoler du milieu	Maîtriser le cycle des pathogènes	Renforcer l'immunité des plantes contre les pathogènes

Les hypothèses sélectionnées dans le microscénario apparaissent en grisé.

■ La surveillance pour des stratégies de protection des cultures sans pesticides chimiques en 2050

Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes d'épidémiosurveillance actuellement en place en Europe sont essentiellement centrés sur des actions curatives, reposant particulièrement sur l'usage de pesticides chimiques. Or, la mise en place de systèmes agricoles sans pesticides chimiques nécessite de reconcevoir les systèmes agricoles en développant des actions prophylactiques qui anticipent le développement potentiel de bioagresseurs en mobilisant des régulations naturelles.

Il est donc indispensable de reconcevoir les systèmes d'épidémiosurveillance, afin qu'ils soient centrés sur la prophylaxie, et qu'ils répondent aux enjeux des futurs systèmes agricoles sans pesticides (Jacquet *et al.*, 2022). Cela demande de décentrer la focale des systèmes d'épidémiosurveillance de l'observation seule des bioagresseurs pour les orienter vers une anticipation des risques liés aux bioagresseurs intégrant une analyse plus globale des agroécosystèmes (atelier d'experts, avril 2021). Il s'agit pour cela d'élargir le cadre de l'épidémiosurveillance en surveillant de nouveaux objets, en élargissant l'échelle spatio-temporelle de la surveillance et en utilisant de nouveaux outils, notamment numériques (Jacquet *et al.*, 2022 ; Morris *et al.*, 2021). Dans cette hypothèse, le terme *épidémiosurveillance* ne serait plus adapté, le système à mettre en place étant plutôt un système de suivi, de surveillance ou de supervision (atelier d'experts, avril 2021 ; Reboud *et al.*, 2022).

Dans cette sous-section, nous examinerons ce qui, à l'issue des ateliers que nous avons menés, devrait caractériser un tel système de suivi et de surveillance, puis nous exposerons les enjeux de suivi et de surveillance pour les trois microscénarios des systèmes de culture en 2050.

Caractéristiques d'un nouveau système de surveillance pour une agriculture sans pesticides

De nouveaux objets à surveiller : observer le cycle de vie des bioagresseurs et développer des indicateurs indirects des bioagresseurs

L'épidémiosurveillance actuelle se base sur l'observation des bioagresseurs déjà présents sur les parcelles agricoles (Jacquet *et al.*, 2022). Or, une agriculture sans pesticides chimiques nécessite d'anticiper les risques et la survenue future de bioagresseurs pour mettre en place des mesures prophylactiques ; une fois les bioagresseurs présents, il est trop tard pour appliquer d'autres solutions que des actions curatives (atelier d'experts, avril 2021). Les actions de surveillance à mettre en œuvre se déclinent différemment selon le type de bioagresseurs, qu'ils soient des pathogènes, des ravageurs ou des adventices, mais, en tous les cas, ils nécessitent d'élargir la perspective de l'observation pour prendre en compte l'historique du cycle de vie des bioagresseurs.

Au cours de leur cycle de vie, les bioagresseurs se développent et se déplacent dans différents milieux et à différentes échelles, au-delà de la parcelle cultivée (Morris *et al.*, 2021 ; Deguine *et al.*, 2023). Ces milieux peuvent être les habitats semi-naturels, le sol, l'air ou l'eau (Morris *et al.*, 2021 ; Petit *et al.*, 2012 ; atelier d'experts, février 2021). Ainsi, les insectes ravageurs et leurs ennemis naturels se développent et se déplacent au-delà des parcelles cultivées, et les habitats non agricoles (c'est-à-dire les habitats semi-naturels) leur procurent les ressources nécessaires à leur survie (Rusch *et al.*, 2016a). Un grand nombre de pathogènes des plantes cultivées sont présents et se développent dans des habitats non agricoles ainsi que dans les sols cultivés (Morris *et al.*, 2009). Les habitats non agricoles vont également exercer une pression de sélection sur les pathogènes qui vont ainsi développer des traits plus ou moins virulents (Morris *et al.*, 2009). Enfin, les graines d'adventices se situent dans le sol et sont dispersées entre parcelles et entre les parcelles cultivées et les habitats semi-naturels (Petit *et al.*, 2012).

Afin d'anticiper les risques liés aux bioagresseurs et à leur développement possible dans les parcelles agricoles, il semble donc nécessaire de prendre en compte l'ensemble des milieux impliqués dans le cycle de vie des bioagresseurs, en surveillant au-delà de la parcelle cultivée, c'est-à-dire les réservoirs non agricoles, les habitats semi-naturels, le sol, l'air et l'eau (Morris *et al.*, 2009, 2021 ; Jacquet *et al.*, 2022).

De nouveaux indicateurs, par des observations indirectes, peuvent permettre une anticipation précoce des bioagresseurs. Ces éléments observables sont corrélés à la présence du bioagresseur. Leur détection permettrait de mieux anticiper les risques (entretien Morris et Soubeyran, 2021). Par exemple, la détection fine de phéromones permettrait de détecter précocement la présence d'insectes ravageurs (Lucas *et al.*, 2019).

Élargir l'échelle spatio-temporelle de surveillance

L'épidémiosurveillance actuelle se fait à des échelles spatiale et temporelle limitées. Elle s'intéresse à la parcelle cultivée et réalise des anticipations de court terme (Jacquet *et al.*, 2022). Or, les mouvements des bioagresseurs s'effectuent à large échelle et sur le long terme en particulier en fonction du cycle de vie des bioagresseurs (Morris *et al.*, 2021 ; Petit *et al.*, 2012). Les pathogènes des plantes et les insectes ravageurs se propagent sur de longues distances au travers de processus naturels, comme l'écoulement des eaux de surface ou la circulation des masses d'air (Morris *et al.*, 2021). Les adventices se disséminent aussi à large échelle et sur le long terme (Petit *et al.*, 2012), par exemple au moyen des routes et des véhicules motorisés (von des Lippe et Kowarik, 2007), ou de l'eau (atelier d'experts, février 2021). Observer la propagation de pathogènes sur de longues distances à travers l'eau ou l'air peut permettre d'anticiper le moment et le lieu d'une invasion dans une nouvelle région (Morris *et al.*, 2021). Par exemple, un modèle évaluant la dissémination de la rouille du soja a permis de prédire le mouvement de la maladie depuis l'Amérique du Sud vers l'Amérique du Nord (Isard *et al.*, 2005). Organiser la surveillance des bioagresseurs à long terme et à large échelle spatiale permettrait donc de mieux anticiper les risques d'invasion de ces bioagresseurs. Les données issues de la surveillance pourraient être mises en lien avec d'autres variables environnementales, comme l'usage des terres afin de réaliser des scénarios de propagation des bioagresseurs sur des longues distances et de mettre en place des actions d'anticipation (Morris *et al.*, 2021).

Cette surveillance demanderait néanmoins de collecter, gérer et interpréter un nombre important de données, ce qui pourrait être possible grâce à l'utilisation couplée d'outils numériques et de modélisations (Morris *et al.*, 2021 ; Reboud *et al.*, 2022).

Les outils au service d'une surveillance élargie

Des outils numériques pour accroître l'acquisition de données

Les outils numériques permettent de découpler l'acquisition de données et de surveiller de nombreux objets différents afin de caractériser l'état de la plante et son environnement (Reboud *et al.*, 2022). Il existe de nombreux capteurs différents pouvant détecter des informations très diversifiées, comme le pH, la température, le flétrissement de la plante, etc. (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Ces capteurs peuvent être fixes – seuls ou en réseau – ou mobiles, attachés à un animal ou embarqués dans des machines agricoles ou des véhicules aériens, comme des drones, des avions ou des satellites (*ibid.*). Ils sont connectés sans fil et le développement de l'Internet des objets, des infrastructures de réseaux basse fréquence ou cellulaires permettent aux capteurs d'être reliés en réseau (Reboud *et al.*, 2022). Ces réseaux de capteurs peuvent aboutir à une information cartographiée (Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2021).

De nouvelles technologies pourraient davantage se développer pour la surveillance agricole. L'utilisation de satellites et de la fouille de textes permettrait une observation à grande échelle pour détecter des informations précoces ; les drones et les robots

dotés de capteurs décuplèrent les observations de proximité (entretien Morris et Soubeyran, 2021).

L'observation humaine reste nécessaire pour acquérir des données de terrain. Les outils numériques peuvent alors faciliter la collecte de données. Par exemple, les smartphones peuvent être utilisés par les agriculteurs pour collecter des observations et les partager au sein d'un réseau d'observation, dans des dispositifs participatifs de production de données, *crowdsourcing* en anglais (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Ainsi, les outils numériques peuvent aussi être centraux pour collecter des données au travers des sciences participatives, citoyenne ou collaborative (Reboud *et al.*, 2022).

Des outils pour gérer des données massives

Les données acquises nécessitent une gestion importante afin de pouvoir être analysées et interprétées.

Tout d'abord, ces données, pour avoir un intérêt, doivent être mutualisées et facilement accessibles afin d'anticiper les risques à large échelle (entretien Morris et Soubeyran, 2021 ; Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Cela pose la question de l'interopérabilité des données massives qui proviennent de différentes sources et qui sont de natures différentes (Bournigal, 2014). L'intégration de données hétérogènes peut se faire grâce à la discipline scientifique de l'ontologie (Bournigal, 2014 ; Morris *et al.*, 2021). L'accès aux données serait réalisé grâce à un portail Web présentant un catalogue de données et de services, avec des informations standards (Morris *et al.*, 2021).

Des bases de données agricoles et des portails accessibles aux agriculteurs existent déjà en Europe. Par exemple, au Danemark, la base de données *LandbrugsInfo* reliée au portail « *landmand.dk* » est utilisée pour la mise au point d'outils d'aide à la décision ainsi que pour informer les agriculteurs, c'est aussi le cas de la plate-forme d'échange de données *Data Hub DKE* en Allemagne (Bournigal, 2016). Cependant, la constitution de plates-formes de données nécessite une réflexion préalable sur la propriété et la gouvernance des données (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017).

Des modèles pour interpréter les données

Les modèles permettent d'analyser et d'interpréter les données, puis d'émettre des préconisations (Bournigal, 2016). Plusieurs types de modèles existent : les modèles mécanistes, qui permettent de comprendre qualitativement le système étudié, mais demandent une connaissance fine des processus (Reboud *et al.*, 2022) ; les approches statistiques qui permettent de traiter des données massives, comme l'apprentissage profond (*deep learning* en anglais) ou l'apprentissage automatique (*machine learning* en anglais), mais qui ont encore des limites (Reboud *et al.*, 2022).

Des modèles hybrides, mélangeant des données massives et des connaissances qualitatives, seraient intéressants à développer (entretien Morris et Soubeyrand, 2021). De tels modèles ont déjà été utilisés pour identifier des facteurs de risques de propagation de pathogènes (Martinetti et Soubeyrand, 2019).

La co-modélisation est aussi un outil intéressant pour comprendre des systèmes complexes (Morris *et al.*, 2021). La co-modélisation fait dialoguer ensemble des experts techniques et scientifiques avec les parties prenantes (consommateurs, citoyens, producteurs, etc.). Cette méthode améliore le partage et l'intégration de connaissances par les différents acteurs et permet de produire des connaissances sur les comportements, les perceptions et les réactions des parties prenantes (*ibid.*). La prise en compte des pratiques agricoles mises en place, les mesures prophylactiques, l'assolement, le choix des variétés, etc., sont à prendre en compte dans les modèles afin de pondérer les préconisations émises en fonction des pratiques (Reboud *et al.*, 2017).

Des outils d'aide à la décision

Les outils d'aide à la décision vont donner des indications à partir de toutes les informations fournies par les données et les modèles afin de prendre des décisions sur le terrain. La surveillance pour une agriculture sans pesticides chimiques s'élargissant au-delà des systèmes agricoles, les outils d'aide à la décision devront s'adresser, en plus des agriculteurs, aux acteurs parties prenantes du territoire (Reboud *et al.*, 2022). Il est nécessaire que les réflexions sur les développements des outils d'aide à la décision impliquent ceux qui prennent les décisions afin que ces outils soient adaptés à chaque situation (entretien Morris et Soubeyrand, 2021).

Les dispositifs de suivi et de surveillance dans les trois microscénarios des systèmes de culture en 2050

Pour chaque microscénario, l'équipe projet et les groupes d'experts ont construit une hypothèse sur le dispositif de suivi et de surveillance qui lui est propre (tableau 2.11). Ce suivi est nécessaire pour mettre en place une protection des cultures efficace ; il permet d'anticiper le développement de bioagresseurs par des actions prophylactiques appropriées.

Le suivi est centré sur des objets spécifiques à observer et à connaître afin d'anticiper le développement de bioagresseurs et de maintenir un bon fonctionnement de la stratégie de protection des cultures. Chaque suivi s'effectue selon des modalités particulières qui concernent les objets à surveiller, l'échelle de la surveillance, les indicateurs de suivi, les méthodes de suivi et de traitement des données, et enfin la mobilisation des résultats du suivi pour la protection des cultures. Ainsi, les objets à suivre varient selon les stratégies de protection des cultures ; ces objets spécifiques sont l'état de la diversité microbienne (des sols particulièrement, et de l'air) et de la santé de l'holobionte, dans un premier cas ; l'état des régulations biologiques à l'échelle des paysages, dans un deuxième cas ; et l'état de la santé de la plante et de son environnement, dans un troisième cas.

Tableau 2.11. Les hypothèses sur les dispositifs de suivi dans les trois microscénarios des systèmes de culture

Microscénario des systèmes de culture	Gérer l'holobionte des plantes cultivées	Concevoir des paysages complexes et diversifiés	Renforcer l'immunité des plantes cultivées
Hypothèse de suivi et de surveillance	Suivi de l'holobionte, de la biodiversité microbienne et des microbiotes	Suivi des régulations biologiques et de la biodiversité à l'échelle du paysage et anticipation de leurs effets sur les récoltes	Suivi de la santé de la plante (état immunitaire et physiologique) et de son environnement
Objet du suivi	Micro-organismes et leurs relations avec la plante cultivée (microbiotes dont celui du sol) <ul style="list-style-type: none"> • Caractériser les réservoirs de diversité microbienne et leur dynamique dans le temps • Caractériser les fonctions du microbiote (« core » microbiote) • Caractériser l'adaptabilité de l'holobionte (capacité à recruter des micro-organismes) 	Régulations biologiques et leurs effets sur les récoltes et la biodiversité à l'échelle du paysage <ul style="list-style-type: none"> • Évaluer et expliciter les effets des interactions entre dynamique de population des bioagresseurs, biodiversité, pratiques et contexte climatique sur les récoltes 	État immunitaire et physiologique de la plante cultivée et de son environnement biotique et abiotique <ul style="list-style-type: none"> • Caractériser l'état immunitaire et physiologique de la plante cultivée • Caractériser l'état de l'environnement biotique et abiotique de la plante cultivée
Échelle	Parcelle, plante et paysage	Paysage et parcelle	Plante, parcelle et paysage
Indicateurs de suivi	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs des fonctions réalisées par le microbiote, pour repérer des situations d'absence des micro-organismes du « core » microbiote cruciaux pour la défense de la plante • Marqueurs caractérisant plante saine ou malade (situations de dysbiose) • Marqueurs de la présence de pathogènes (bactéries, champignons) 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs des effets sur les récoltes (dommages ou pertes de récolte avec des seuils de nuisibilité redéfinis) et sur la biodiversité (autres organismes vivants non néfastes aux récoltes) • Indicateurs explicitant ces effets : <ul style="list-style-type: none"> – Indicateurs portant sur la dynamique des populations de bioagresseurs – Indicateurs portant sur la biodiversité (ennemis naturels, agrobiodiversité) – Indicateurs portant sur les pratiques agricoles, la composition et la configuration de la mosaïque des cultures • Indicateurs portant sur le contexte climatique 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs moléculaires de l'état immunitaire et physiologique de la plante cultivée (concentration en certains pigments ou métabolites, etc.) • Indicateurs optiques : indicateurs biologiques (caractérisation des microbiotes semencier, aérien et du sol ; croissance et sénescence des plantes cultivées ; présence de ravageurs, de pathogènes ou d'adventices) et agronomiques (successions et pratiques culturales, état de désherbage, variétés, porte-greffes) • Indicateurs physico-chimiques de l'état de l'environnement abiotique aérien et du sol de la plante cultivée (conditions météorologiques, caractéristiques du sol, teneurs en COV, etc.)

Microscénario des systèmes de culture	Gérer l'holobionte des plantes cultivées	Concevoir des paysages complexes et diversifiés	Renforcer l'immunité des plantes cultivées
<p>Méthode de suivi et de traitement des informations</p>	<p>Outil de diagnostic du microbiote du sol :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outils de métagénomique par séquençage des micro-organismes pour identifier la diversité des pathogènes et des micro-organismes commensaux ou mutualistes • Analyse automatisée s'appuyant sur des algorithmes d'interprétation pour caractériser les fonctions des micro-organismes dans le microbiote • Outils pour caractériser la présence de mycorhizes dans le sol • Outils mutualisés de proxidtection afin de détecter la présence de symptômes sur les plantes <p>Acteurs du suivi :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suivi participatif par des groupes d'agriculteurs 	<p>Outils de diagnostic des régulations biologiques et de leurs effets :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suivi automatisé avec des capteurs (haute résolution temporelle et spatiale) combiné à un suivi rapide (observations moins précises, plus qualitatives) • Suivi interannuel et intraannuel des relations entre indicateurs • Modèles pour cartographier la diffusion spatio-temporelle des bioagresseurs <p>Acteurs du suivi :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suivi participatif par les acteurs des paysages (citoyens, acteurs des chaînes d'approvisionnement agricole, acteurs non agricoles) • Financeurs des actions 	<p>Outils de diagnostic de l'état immunitaire et physiologique de la plante cultivée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analyses génomiques et moléculaires (méthodes destructrices) de la plante cultivée pour quantifier les indicateurs moléculaires • Nez électroniques en cours de développement pour quantifier les indicateurs olfactifs • Plantes sentinelles implantées dans la parcelle ou le paysage • Proxidtection (par exemple, capteurs au sol, drones, etc.) à l'échelle locale (plante et son environnement immédiat) ou télédtection (par exemple, drones, satellites, etc.) à de larges échelles spatiales pour quantifier les indicateurs optiques <p>Acteurs du suivi :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Organisation et gestion collectives des moyens d'observation, des technologies numériques de traitement de l'information, des données et des résultats produits à partir des suivis
<p>Mobilisation du suivi pour la protection de cultures</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Approche systémique et historique : penser les successions culturelles à partir de la connaissance (i) de l'état et de l'historique du microbiome du sol, (ii) du système de culture et (iii) d'indicateurs de la fertilité des sols, afin de sélectionner des micro-organismes favorables aux cultures (par exemple, les symbioses) • Dispositifs d'apprentissage collectif des nouveaux outils parmi les groupes d'agriculteurs pour constituer un savoir-faire afin d'interpréter les données et concevoir <i>in situ</i> des stratégies de gestion de l'holobionte 	<ul style="list-style-type: none"> • Approche systémique et adaptative : apprentissage sur les interactions et transformations opérant dans les paysages, capitalisation année après année pour transformer l'expérience en règles de décision • Partage des risques et des bénéfices à l'échelle des paysages ; responsabilisation des acteurs du paysage sur les effets de leurs actions • Réseaux d'échange des expériences et connaissances à l'intérieur et entre les paysages 	<ul style="list-style-type: none"> • Penser les successions et les pratiques culturelles à partir des données passées et présentes sur l'état immunitaire et physiologique de la plante cultivée, la présence de bioagresseurs, l'état de l'environnement biotique et abiotique de la plante cultivée • Formations et dispositifs d'apprentissage collectif des agriculteurs et des autres acteurs para-agricoles territoriaux à l'acquisition, au traitement et à l'utilisation des données et des résultats, de manière à les mettre en capacité de partager du conseil, des données et des agroéquipements pour évaluer le statut immunitaire des plantes et intervenir de manière préventive plutôt que curative

3. Les changements nécessaires dans les autres dimensions du système alimentaire en 2050

Parvenir à une agriculture sans pesticides chimiques d'ici 2050 implique de transformer différentes composantes des systèmes alimentaires, au-delà des systèmes de culture. Cela nécessite particulièrement de penser une transformation des agroéquipements et des structures agricoles qui vont mettre en œuvre ces innovations, cela rend également indispensable une transformation des chaînes de valeur qui vont commercialiser des produits issus de systèmes de culture sans pesticides chimiques. C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude prospective, outre l'élaboration de scénarios d'évolution des systèmes de culture sans pesticides chimiques, d'autres composantes du système alimentaire ont été étudiées pour identifier la manière dont leurs changements pourraient façonner une agriculture sans pesticides chimiques en 2050. Il s'agit des structures agricoles, des agroéquipements et des technologies numériques, ainsi que des chaînes de valeur alimentaires. Pour chacune de ces composantes, une analyse rétrospective a été menée, identifiant les grandes tendances, les signaux faibles et les ruptures possibles au travers de revues de la littérature scientifique et d'entretiens. Sur la base de ces analyses, des scénarios décrivant les évolutions possibles de ces composantes d'ici 2050 ont été élaborées. Ce chapitre présente les résultats de ce travail.

1. Quelles structures des exploitations agricoles en Europe pour mettre en œuvre des systèmes sans pesticides chimiques en 2050 ?

Berne J.-A., Mora O.

Les structures agricoles, leur organisation et la manière dont elles s'insèrent dans les chaînes de valeur sont des éléments à prendre en compte pour envisager une agriculture européenne sans pesticides en 2050. L'objet de ce chapitre est d'imaginer les structures qui, en 2050, mettront en œuvre des systèmes de culture sans pesticides chimiques. Ce chapitre explore le champ des futurs possibles concernant les structures d'exploitations agricoles en 2050 en Europe, à travers la construction de scénarios d'évolution des structures.

Donnars *et al.* (2018) caractérisent les structures d'exploitations agricoles par la combinaison des facteurs de production (travail, capital, terre) et leur intégration dans des dynamiques sociales et économiques. C'est pourquoi la gouvernance des structures agricoles et l'organisation des facteurs de production (travail, capital, terre) ont été choisies comme composantes des microscénarios visant à imaginer des types de structures en 2050. Les structures d'exploitations agricoles étant très diverses en Europe (Eurostat, 2021a), une troisième composante étudie la distribution des structures en Europe.

Ainsi, le travail de prospective s'est construit autour de ces trois composantes qui définissent les structures d'exploitations agricoles en Europe : la distribution des structures en Europe, la gouvernance des structures, l'organisation des facteurs de production. Pour chacune d'elles, une analyse rétrospective des tendances lourdes, des signaux faibles et des ruptures possibles a été conduite à partir d'une revue de la littérature scientifique et d'interviews d'experts (tableau A.10), puis sur cette base, différentes hypothèses d'évolution d'ici 2050 ont été élaborées.

La construction de microscénarios en 2050 s'est faite en deux étapes. La combinaison des hypothèses d'évolution des composantes « Gouvernance des structures » et « Organisation des facteurs de production » a permis, dans un premier temps, d'élaborer des hypothèses sur les types de structures d'exploitations agricoles qui pourraient exister en 2050. Ces hypothèses d'évolutions ont été ensuite articulées à celles de la composante « Distribution des structures en Europe » pour former les microscénarios d'évolution des structures des exploitations agricoles en Europe en 2050.

Ce chapitre est divisé en trois parties : la première porte sur l'évolution des structures agricoles, la seconde sur l'organisation des facteurs de production et l'évolution de la gouvernance des structures agricoles en Europe, tandis que la troisième présente les évolutions possibles des structures agricoles en Europe en 2050 à travers trois microscénarios.

I L'évolution des structures agricoles en Europe

Trois facteurs caractérisent les évolutions récentes des structures agricoles en Europe : une réduction du nombre d'exploitations, une croissance de la taille des exploitations et une spécialisation de la production (Neuenfeldt *et al.*, 2019).

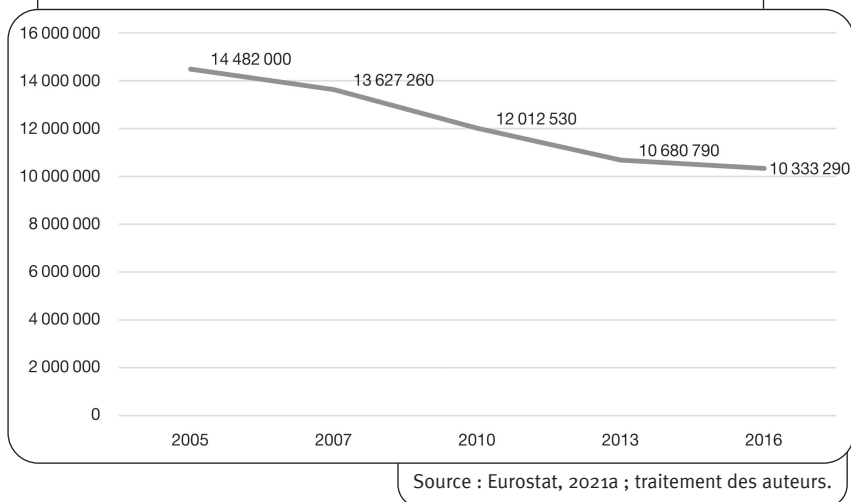
L'évolution du nombre et de la taille des structures agricoles en Europe

En 2016, il y avait 10,5 millions d'exploitations agricoles dans l'Union européenne (Eurostat, 2021a). La Roumanie, la Pologne, l'Italie, l'Espagne et la Grèce sont les États européens avec le nombre d'exploitations agricoles le plus important.

À l'échelle européenne, le nombre d'exploitations agricoles est en nette diminution depuis plusieurs décennies (figure 3.1). En 9 ans, entre 2007 et 2016, on observe une diminution moyenne de 24 % du nombre d'exploitations agricoles en Europe

(Daniłowska, 2018). La diminution du nombre d'exploitations s'est fortement accélérée depuis les années 2000, notamment avec l'entrée de nouveaux États membres de l'Europe centrale et de l'Est dans l'Union européenne (UE), qui connaissent les changements structuraux les plus importants (Piet, 2018).

Figure 3.1. Évolution du nombre d'exploitations agricoles dans l'Union européenne (excepté la Croatie) entre 2005 et 2016



Cette diminution du nombre d'exploitations concerne tous les États membres (sauf l'Irlande), mais se fait à des rythmes très différents d'un état à l'autre, allant d'une réduction de 6 % au Portugal à plus de 50 % en Bulgarie et en Slovaquie, sur la période 2008-2016 (Daniłowska, 2018). Les plus fortes diminutions du nombre d'exploitations agricoles concernent surtout les états d'Europe Centrale et de l'Est, avec une diminution de plus de 30 % en Slovaquie, Bulgarie, Pologne, Lettonie, Lituanie, République tchèque et Hongrie. Certains États d'Europe de l'Ouest et du Nord connaissent également une diminution de leur nombre d'exploitations supérieure à la moyenne européenne, comme l'Allemagne, la Finlande, les Pays-Bas ou l'Italie.

Dans tous les États membres, la diminution du nombre d'exploitations agricoles s'accompagne d'une augmentation de la surface moyenne cultivée par exploitation. Entre 2005 et 2010, le nombre d'exploitations agricoles a diminué à un rythme de 3,7 % par an, alors que la taille moyenne des exploitations a augmenté de 3,8 % par an (Neuenfeldt *et al.*, 2019). Cela traduit un phénomène de forte concentration des terres en Europe ces dernières décennies, mais aussi une forte spécialisation des structures agricoles (Pospecu, 2013 ; Daniłowska, 2018 ; Schuh *et al.*, 2019).

La distribution des types de structures agricoles en Europe

Une distribution duale des exploitations en Europe

Quand on s'intéresse à la distribution des structures agricoles et à leur occupation du sol, on constate une coexistence duale des structures agricoles en Europe. Les plus grandes exploitations représentent une faible part des exploitations agricoles, mais occupent une part importante des terres agricoles ; à l'opposé, les plus petites exploitations agricoles représentent une part importante de nombre d'exploitations, mais n'occupent qu'une faible part de la surface agricole utile (SAU). En 2016, en Europe, 13 % des exploitations les plus grandes occupaient 80 % de la surface agricole utile, alors que 80 % des plus petites exploitations occupaient 13 % de la surface agricole utile (figure 3.2).

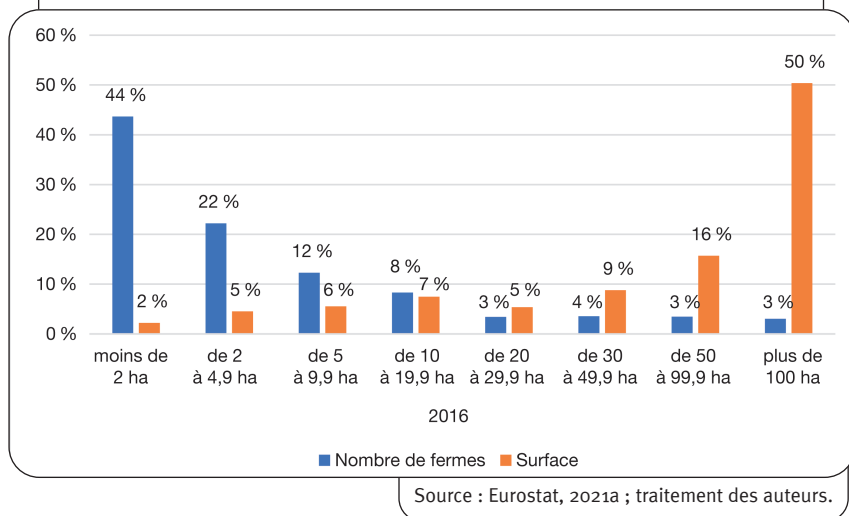
Il y a cependant une grande diversité des structures agricoles à l'intérieur de l'Union européenne en ce qui concerne leur taille, leur structure ainsi que leur orientation productive, ce qui traduit la coexistence de différents modèles de structures agricoles en Europe. Ces structures agricoles varient de petites exploitations familiales, comme au sud de l'Allemagne, à de grandes exploitations de plusieurs milliers d'hectares, de type *holding*, avec de nombreux employés, comme dans les nouveaux États membres (Happe *et al.*, 2008). Il y a ainsi une diversité des structures entre États européens, mais aussi entre les régions d'un même État (Guiomar *et al.*, 2018).

Une distribution des terres duale ou ternaire en fonction des types de structures présents dans les États

Si la distribution du nombre des structures est souvent duale en Europe, la répartition de la SAU entre les classes de structure varie d'un État à l'autre. Certains États ont une distribution des terres très inégalitaire, comme la Bulgarie où 3 % des plus grandes exploitations (supérieures à 100 ha) utilisent 82 % de la SAU totale, alors que les exploitations de moins de 2 ha représentent 70 % des exploitations, mais n'occupent que 2 % de la SAU totale. D'autres États ont une répartition plus homogène de la taille des exploitations et une distribution plus égalitaire de la surface agricole utile, comme l'Autriche où un grand nombre d'exploitations de taille moyenne coexistent avec des exploitations de petite et grande taille. On peut qualifier cette distribution des structures en Autriche de ternaire. Ce type de coexistence est aussi observé en Pologne et en Allemagne, où les exploitations moyennes ont une place importante dans la distribution des structures agricoles.

La forte dualité des structures dans certains États peut s'expliquer par la taille des plus grandes exploitations (supérieures à 100 ha), celle-ci varie fortement d'un État à l'autre. D'après Piet (2018), en 2010, les exploitations de plus de 100 ha avaient une surface moyenne de 175 ha en France, mais pouvaient atteindre des surfaces moyennes bien plus importantes dans d'autres États : « 275 ha en Allemagne, 400 ha en Hongrie, 475 ha en Roumanie, près de 700 ha en Bulgarie et en République tchèque, et plus de 780 ha en Slovaquie ». Piet (2018) a ainsi développé un indice de la répartition de

Figure 3.2. Répartition du nombre de fermes et de leur occupation de l'espace (part de la SAU) par classe de taille des structures agricoles en Europe en 2016



la surface dans les différents États en calculant la part de la surface valorisée par les 20 % des exploitations les plus grandes. Ainsi, les États les plus « égalitaires » sont l'Irlande et la Finlande où les 20 % des exploitations les plus grandes occupent 50 % de la SAU. À l'opposé, la Hongrie, la Slovaquie et la République tchèque sont très inégalitaires, les 20 % des exploitations les plus grandes utilisant 95 % des terres. La France se trouve dans la moyenne avec 60 % de la SAU occupée par les 20 % des exploitations les plus grandes.

Une dépendance au chemin expliquant l'absence de convergence des structures agricoles en Europe

Une hypothèse qui a été très tôt formulée, dès l'intégration des États d'Europe de l'Est et d'Europe centrale dans l'UE, était que cette intégration allait produire à terme une convergence des structures agricoles dans l'UE. Cependant, le maintien d'une diversité des structures entre États européens, mais aussi à l'intérieur des États européens montre une tout autre dynamique (Balmann *et al.*, 2006). En effet, il y a une dépendance au chemin des structures agricoles, en plus des facteurs historiques (collectivisation, remembrement, etc.). Cette dépendance au chemin peut s'expliquer par les coûts irrécupérables (*sunk cost*) des structures agricoles qui mobilisent des équipements et des bâtiments déjà existants et s'évitent ainsi des investissements lourds (Balmann, 1999 ; Balmann *et al.*, 2006). Ainsi, Neuenfeldt *et al.* (2019) montrent que la majorité des changements structurels des structures agricoles observés en Europe s'expliquent par la situation passée ; c'est-à-dire par les proportions des

types de structures agricoles antérieurement présentes. Les auteurs concluent en soulignant que cela « indique l'importance des spécialisations historiques sur de longues périodes » (*ibid.*).

La spécialisation des structures agricoles

La spécialisation technico-économique des exploitations agricoles se traduit principalement par une spécialisation de leurs productions. En production végétale, cela se manifeste par une réduction de la diversité des cultures, une simplification des assolements et une diminution de la diversité génétique des plantes cultivées (Fuzeau *et al.*, 2012 ; Barbottin *et al.*, 2018). En production animale, les exploitations se spécialisent dans un type de production animale (bovins lait, bovins viande, ovins, porcs ou volailles), passant de systèmes de polyculture-élevage ou de polyélevage (type bovin mixte) à de la monoactivité (Schott *et al.*, 2018). D'après Eurostat (2022), la part d'exploitations mixtes (polyculture, polyélevage et culture-élevage) a diminué de 9 points de pourcentage, tandis que celle d'exploitations en production végétale (grandes cultures, cultures permanentes et horticulture) a augmenté de 9 points de pourcentage entre 2005 et 2016. Sur la même période, le pourcentage d'exploitations spécialisées en élevage et en cultures permanentes reste stable.

On observe une spécialisation des régions européennes avec une concentration géographique des productions (Eurostat, 2022 ; Roguet *et al.*, 2015). D'une part, il y a une forte concentration des productions animales dans des bassins de production avec une forte densité de cheptel et des exploitations de plus en plus grandes (Roguet *et al.*, 2015). Ces bassins de production européens sont : le Danemark, le nord-ouest de l'Allemagne, les Pays-Bas, la Flandre belge, l'ouest de la France, le nord de l'Italie (plaine du Pô), le nord-est de l'Espagne (Catalogne), l'Irlande, l'ouest de la Grande-Bretagne et plus modestement le sud de l'Allemagne, le centre-est de la Pologne et autour du Massif central. D'autre part, d'autres régions européennes se sont spécialisées en grandes cultures, comme les céréales, les oléagineux, les protéagineux, etc. (Eurostat, 2022), du fait de l'abandon progressif de l'élevage au profit d'exploitations de grandes cultures dans les régions les plus propices (Schott *et al.*, 2018). Enfin, certaines productions, en particulier les cultures permanentes, qui sont liées à des contraintes géographiques particulières, restent concentrées dans des régions spécifiques (par exemple, les cultures permanentes dans les régions méditerranéennes).

La spécialisation régionale a conduit à une dissociation spatiale entre culture et élevage qui va de pair avec l'agrandissement des exploitations (Chatellier et Gaigné, 2012 ; Roguet *et al.*, 2015).

Divers facteurs expliquent l'agrandissement des exploitations, leur spécialisation et la concentration géographique des productions : les économies d'échelle, c'est-à-dire « l'accroissement de la production d'un bien s'accompagnant d'une diminution des coûts moyens de production » (Chatellier et Gaigné, 2012) ; la faiblesse des économies de gamme définies comme « la baisse des coûts due à la production conjointe

par rapport à la production séparée de quantités égales de biens » (*ibid.*) ; la libéralisation de l'économie ; la mondialisation des échanges ; l'élargissement géographique des flux entrants et sortants ; les politiques agricoles ; ainsi que les économies d'agglomération dans l'organisation des filières et des chaînes de valeur (Balman *et al.*, 2006 ; Chatellier et Gaigné, 2012 ; Roguet *et al.*, 2015 ; Therond *et al.*, 2017 ; Hansen, 2020 ; Hardelin et Schwoob, 2021).

La spécialisation des exploitations est liée à l'intensification de la production et de l'utilisation d'intrants (Eurostat, 2022). Cette intensification conduit à une diminution de la diversité des assolements et de la diversité génétique, mais aussi à une simplification des paysages (agrandissement des parcelles, fragmentation des paysages, diminution des habitats semi-naturels), ce qui entraîne une perte de la biodiversité, et donc une diminution de la qualité des écosystèmes (Eurostat, 2022 ; Tsharntke *et al.*, 2005 ; Reidsma *et al.*, 2006).

La forte concentration géographique des élevages entraîne aussi plusieurs externalités environnementales négatives en concentrant les pollutions d'origine agricole (Tamminga, 2003), qui dégradent les eaux par les nitrates et le phosphore, ainsi que les sols et l'air par l'ammoniac et les pathogènes (Roguet *et al.*, 2015). Les zones à forte densité d'élevage posent aussi une diversité de problèmes, notamment liés à l'apport excessif d'azote sur les zones littorales, à un risque sanitaire élevé (épizooties, zoonoses, antibiorésistances) et une dégradation du paysage (*ibid.*). Ces externalités négatives peuvent engendrer des conflits de voisinage qui freinent les projets d'installation ou de transformation des exploitations (Delanoue et Roguet, 2015).

La dissociation géographique entre les zones de production animale et végétale a aussi entraîné une forte dépendance des exploitations aux engrais azotés et aux importations de protéines végétales, qui se traduit par une forte dépendance aux marchés mondiaux et à la géopolitique de l'énergie (Hardelin et Schwoob, 2021).

Face à ces nombreux problèmes liés à la spécialisation, plusieurs auteurs suggèrent qu'une dé-spécialisation territoriale et une rediversification des cultures seraient intéressantes pour réduire les externalités négatives liées à la concentration régionale (biodiversité, qualité de l'eau, de l'air et du sol, relation avec le voisinage) et pour renforcer les interactions entre l'élevage et les cultures (Chatellier et Gaigné, 2012 ; Hardelin et Schwoob, 2021).

À l'avenir, la hausse des prix des intrants et de l'énergie, l'accroissement possible des coûts de transports et la volatilité des prix des céréales pourraient pousser à une réassociation des productions végétales et animales au sein du même territoire (Chatellier et Gaigné, 2015). Une rediversification des cultures permettrait aux territoires d'être moins vulnérables aux chocs climatiques et économiques et de réduire l'usage de fertilisants chimiques. Cependant, la rediversification des cultures fait aussi face à plusieurs verrouillages sociotechniques, notamment liés à l'organisation des filières

(Meynard *et al.*, 2014). Néanmoins, certaines politiques publiques pourraient orienter les structures vers des dynamiques de dé-spécialisation (Ansaloni et Fouilleux, 2006).

I L'organisation des facteurs de production des structures agricoles en Europe

La main-d'œuvre agricole : diminution et vieillissement de l'emploi agricole, développement de la pluriactivité et recours accru aux prestations de service

L'emploi agricole représente en moyenne 4,2 % de l'emploi total dans l'UE en 2016 (Eurostat, 2021b), avec de fortes variations selon les États européens.

En 2016, 9,5 millions de personnes travaillaient dans l'agriculture en Europe (en équivalent temps plein), dont une grande part à temps partiel (Eurostat, 2021b).

La main-d'œuvre agricole européenne est en nette diminution depuis plusieurs décennies. Schuh *et al.* (2019) observent une diminution de 30 % de la main-d'œuvre agricole européenne entre 2003 et 2013. Pour l'ensemble de l'UE, ce sont près de 2,5 millions de travailleurs qui sont sortis du secteur agricole sur la période 2007-2017 (Schuh *et al.*, 2019). La forte baisse de l'emploi agricole s'explique par différents facteurs : la diminution du nombre d'exploitations agricoles et leur concentration grâce aux économies d'échelle ; les progrès techniques, notamment l'augmentation de la mécanisation et l'adoption de nouvelles technologies ; la différence de revenu entre le secteur agricole et d'autres secteurs économiques, particulièrement dans les nouveaux États membres où l'adhésion à l'UE a permis de nouvelles opportunités d'emploi (Schuh *et al.*, 2019). En conséquence, les emplois agricoles sont aujourd'hui moins nombreux mais plus productifs qu'auparavant (EC, 2013a).

La main-d'œuvre agricole européenne reste très familiale. En 2016, 9 personnes sur 10 travaillant de manière régulière dans l'agriculture étaient chefs d'exploitation ou membres de la famille du chef d'exploitation (Eurostat, 2021b). De même, 92 % du travail dans les exploitations agricoles est effectué par de la main-d'œuvre familiale (EC, 2013b).

La population agricole européenne est structurellement âgée. En 2016, 58 % des chefs d'exploitations agricoles étaient âgés de 55 ans et plus (Eurostat, 2021b). Il y a une augmentation de la part des exploitations gérées par des exploitants de plus de 65 ans, dans la majorité des États européens, avec en 2016, plus de 40 % des chefs d'exploitations âgées de plus de 65 ans au Portugal, en Roumanie et en Italie (Schuh *et al.*, 2019 ; Eurostat, 2021b).

De plus, l'installation de jeunes agriculteurs est de plus en plus difficile. Ils ont difficilement accès aux terres agricoles sur lesquelles il y a une forte tension (Kay *et al.*, 2015) et les exploitations de plus en plus grandes et capitalisées sont difficilement transmissibles (Nguyen *et al.*, 2020). La plupart des régions européennes connaissent une forte diminution du nombre d'exploitations gérées par des exploitants de moins de 35 ans,

particulièrement l'Espagne, le Portugal, l'Italie, la Finlande, le Danemark, la Pologne, la Roumanie, la Bulgarie, la Hongrie et la République tchèque (Eurostat, 2021b).

La majorité des personnes travaillant de manière régulière dans l'agriculture sont pluriactives (c'est-à-dire qu'elles exercent d'autres activités). En 2016, seuls 17 % des travailleurs agricoles exerçaient cette activité à temps plein, 83 % de la main-d'œuvre agricole européenne exerçait donc plusieurs activités (Eurostat, 2021b). L'activité agricole dans l'exploitation est une activité secondaire pour plus de 40 % des chefs d'exploitations en Bulgarie, en Suède, en Finlande et au Danemark. Les chefs d'exploitations travaillant dans des exploitations agricoles de petite taille exercent majoritairement à temps partiel, contrairement à ceux travaillant dans des exploitations de grande taille qui sont majoritairement à temps plein. Ainsi, 60 % des chefs d'exploitation de moins de 5 ha passent moins d'un quart de leur temps de travail sur leur exploitation, alors que 70 % des exploitants sur des structures de plus de 100 ha sont à temps plein (EC, 2013b).

Divers facteurs influencent la pluriactivité : les spécificités de l'exploitation et de l'exploitant (taille, spécialité de l'exploitation, âge, genre de l'exploitant), le niveau de formation de l'exploitant et du ménage agricole, l'emplacement de l'exploitation (la proximité d'un centre urbain, d'une zone touristique, l'accessibilité à des marchés, l'attrait paysager) et les politiques agricoles (Shahzad et Fischer, 2021).

Parallèlement à la réduction de l'emploi agricole, le recours à la sous-traitance s'est fortement développé ces trente dernières années. Par exemple, en France, le nombre d'exploitations agricoles ayant recours de manière importante à la sous-traitance a augmenté de 53 % entre 2010 et 2016 (Bignebat *et al.*, 2019). La sous-traitance a aussi changé de nature. Si elle est originellement employée pour certaines tâches précises afin de combler un manque de matériel pour certaines opérations culturales, elle a évolué vers une délégation de certains travaux agricoles (par exemple, les éleveurs sous-traitent les tâches liées à la production végétale afin de se concentrer sur l'élevage), voire vers une délégation intégrale de l'exploitation qui « consiste à confier à un tiers non seulement la réalisation de tous les travaux sur l'exploitation, mais également la gestion économique et administrative de l'entreprise » (Nguyen *et al.*, 2020). On est ainsi passé d'une « sous-traitance de capacité ou économique » à une « sous-traitance de spécialité ou stratégique » répondant à de nouvelles stratégies patrimoniales (*ibid.*).

Les tensions autour du modèle de l'agriculture familiale en Europe

L'agriculture européenne est encore très familiale (Hervieu et Purseigle, 2009) avec pour caractéristique une unité des facteurs de production (travail, capital et terre) (Cochet, 2018). La majeure partie du travail requis est réalisée par l'agriculteur (chef d'exploitation) ou un membre de sa famille, et le travail et le capital sont entre les mêmes mains (que l'agriculteur soit propriétaire ou non de la terre). Dans ce type d'exploitation familiale, la valeur ajoutée créée et perçue par l'agriculteur est allouée

au revenu du ménage (*ibid.*). En ce qui concerne la gouvernance, le caractère familial de ces structures peut être vu comme le fait que l'agriculteur et sa famille prennent les décisions, qu'ils possèdent ou louent leurs terres et qu'ils décident où ils se fournissent en intrants et à qui ils vendent leurs produits (Donnars *et al.*, 2018).

Il existe cependant différentes formes d'agriculture familiale en Europe. Ainsi, Hervieu et Pursegle (2009) observent dans certaines régions de l'UE, notamment dans les Carpates polonaises et roumaines, le maintien de formes d'agriculture familiale « paysanne » motivées par la sauvegarde et la reproduction d'un patrimoine familial. Une autre forme d'agriculture familiale, d'apparition plus récente, est l'agriculture familiale « sociétaire », où la propriété foncière et le capital restent familiaux, mais sont dissociés du travail agricole (Jeanneaux *et al.*, 2020). Elle est tournée vers l'exportation et son organisation s'éloigne des exploitations agricoles familiales traditionnelles (*ibid.*).

L'agriculture familiale européenne est néanmoins en mutation. Les exploitations agricoles font de moins en moins l'objet d'une transmission patrimoniale entre générations, mais donnent de plus en plus lieu à des installations hors cadre familial, et le métier d'agriculteur devient l'objet d'un choix personnel (Jeanneaux *et al.*, 2020). Les exploitations familiales ont également de plus en plus recours au travail salarié et à la délégation de certaines activités (*ibid.*).

En lien avec ces structures familiales, les organisations collectives ont eu un rôle central dans la modernisation agricole, notamment en favorisant le partage d'outils de production et les échanges entre pairs, mais aussi l'organisation des filières agricoles au travers de l'émergence de coopératives. Les agriculteurs s'organisent collectivement afin de répondre à divers enjeux et de mutualiser des ressources, telles que les intrants, les équipements, les infrastructures, le travail, les salariés, la production et le foncier (Lucas *et al.*, 2014). Ces organisations sont d'autant plus intéressantes qu'elles peuvent favoriser l'innovation et la transition des systèmes agricoles vers de nouvelles pratiques (Lucas *et al.*, 2014 ; Lecole et Moraine, 2021 ; Cardona *et al.*, 2021).

Les coopératives ont actuellement une place importante dans les filières agricoles européennes. Bijman et Iliopoulos (2014) estiment que, pour les produits agricoles, la part du marché de toutes les coopératives agricoles de l'UE était de 40 % en 2010. Les coopératives sont encore plus présentes dans certains États et dans certaines filières. Elles contribuent à plus de 60 % de la production agricole dans les États de l'Union européenne des quinze, atteignant dans certains secteurs 90 % de la production, comme dans la production laitière au Danemark et en Finlande ; dans la production porcine au Danemark ; et dans la production de fleurs aux Pays-Bas (Igal et Martí, 2008). En revanche, les coopératives sont beaucoup moins présentes dans les États de l'Europe Centrale et de l'Est (Gijssels et Bussels, 2014 ; Igal et Martí, 2008).

Néanmoins, depuis une trentaine d'années, pour s'adapter à un environnement concurrentiel et aux marchés globalisés, les coopératives ont changé leur stratégie, en diversifiant et internationalisant leurs activités. Elles se sont ouvertes à des capitaux

extérieurs (Koulytchizky et Mauget, 2014). Cela a conduit au regroupement de grands groupes coopératifs internationaux de plusieurs milliers d'adhérents (Igal et Martí, 2008 ; Candemir *et al.*, 2021). Les coopératives se sont ainsi éloignées de leur modèle initial et se sont rapprochées du fonctionnement de firmes privées (Valiorgue *et al.*, 2020). En Europe, il existe encore des coopératives locales de petite taille, ancrées territorialement, où la gouvernance reste collective, aux mains des agriculteurs (Barbot *et al.*, 2020).

Ainsi, l'agriculture familiale en Europe fait face à de nombreux défis. Son accès au marché, sa place dans la gestion écologique de la planète, son rapport au reste de la société, et son organisation collective dans un contexte marqué par l'ouverture des marchés et l'arrivée de nouveaux acteurs financiers (Hervieu et Purseigle, 2009), tout cela amène à questionner une gouvernance exclusivement familiale dans les exploitations européennes et à envisager le rôle d'autres acteurs et d'autres dynamiques dans la gouvernance des exploitations.

Le capital des exploitations et les capacités d'investissement : l'ouverture aux capitaux extérieurs

En Europe, le modèle historique de l'agriculture familiale s'érode face à la forte concentration des terres qui s'effectue aux dépens des petites exploitations familiales (Kay *et al.*, 2015). Les terres agricoles sont « concentrées dans un nombre toujours plus réduit de grandes exploitations sous le contrôle de quelques sociétés » (*ibid.* ; van der Ploeg *et al.*, 2015).

En Europe, depuis la mise en place de la politique agricole commune en 1962, « les fonds propres [des structures agricoles] et l'endettement bancaire ont été, et restent, les outils privilégiés du financement de l'agriculture » (Nguyen *et al.*, 2017). Cependant, le capital des exploitations agricoles européennes, bien qu'encore majoritairement familial (fonds propres, endettement bancaire), s'ouvre petit à petit à l'extérieur avec des types de financement variés. Ces différents modes de financement posent la question de l'unité des facteurs de production, avec des formes d'agriculture où le capital, le foncier et le travail, bien qu'en partie familiaux, peuvent se retrouver segmentés entre les mains d'acteurs variés.

Ainsi, de plus en plus d'exploitations ont recours à des capitaux extérieurs, Nguyen *et al.* (2017) définissent quatre idéaux-types de financement des exploitations agricoles par des capitaux externes correspondant à des acteurs et des logiques différentes : la gouvernance actionnariale, où les investisseurs sont non locaux et non connus et dont l'objectif est le rendement financier ; la gouvernance actionnariale de type capitalisme familial, où les financeurs sont les membres de la famille élargie, mais ne sont pas exploitants ; la gouvernance actionnariale de type entrepreneurial où les investisseurs sont des « exploitants-investisseurs » eux-mêmes issus du milieu agricole ; la gouvernance actionnariale de type solidaire où les investisseurs sont la plupart du temps dans un lien de proximité avec les agriculteurs dans une logique éthique et solidaire.

L'évolution de la gouvernance des structures agricoles

L'agriculture européenne est encore majoritairement familiale, avec des structures où les facteurs de production (travail, capital, foncier) sont entre les mêmes mains. Néanmoins, les facteurs de production ont tendance à être de plus en plus segmentés à l'intérieur des exploitations agricoles sous l'effet de différentes dynamiques : le rapport entre le travail et le capital qui évolue avec le développement de technologies numériques (Jeanneaux, 2018 ; Klerx *et al.*, 2019) ; de nouvelles formes d'agriculture et le développement de nouvelles organisations du travail, comme le recours au travail salarié ou à la délégation du travail (Schuh *et al.*, 2019 ; Nguyen *et al.*, 2020) ; une appropriation des terres par des acteurs financiers (van der Ploeg *et al.*, 2015) ; et une ouverture des structures à des capitaux externes (Nguyen *et al.*, 2017) ; mais aussi par l'insertion des structures dans les dynamiques territoriales (Lamine *et al.*, 2019). La gouvernance des structures est fortement affectée par ces transformations.

La gouvernance face au développement des technologies numériques

Le développement des technologies numériques en agriculture interroge le rapport entre le travail et le capital à l'intérieur des structures d'exploitations agricoles. Klerx *et al.* (2019) définissent cette évolution comme un « processus sociotechnique d'application d'innovations numériques ». Elle regroupe de nombreuses technologies : les données massives, l'internet des objets, la réalité augmentée, la robotique, les capteurs, l'impression 3D, l'intégration des systèmes, la connectivité universelle, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, les jumeaux numériques ou la chaîne de blocs (*blockchain* en anglais). De nombreux concepts sont utilisés pour décrire l'usage du numérique dans l'agriculture : agriculture intelligente (*smart farming* en anglais), agriculture de précision, agriculture numérique ou 4.0 (*ibid.*).

Il est attendu que l'agriculture numérique permette de nouveaux gains de productivité en optimisant les systèmes agricoles (réduction du temps de travail, réduction des coûts, maximisation des rendements, réponse aux attentes environnementales et sociales), notamment grâce à la collecte de nombreuses données par divers outils de surveillance (capteurs, drones, satellites), leur traitement et la sélection de la meilleure solution (outils d'aide à la décision), la production, l'échange et l'appropriation de connaissances, ainsi que l'automatisation et la robotisation des tâches (Jeanneaux, 2018 ; Klerx *et al.*, 2019). Cependant, le développement du numérique dans l'agriculture soulève de nombreuses questions, notamment sur le rapport de l'agriculteur à son métier et son autonomie dans la prise de décision (Jeanneaux, 2018). Les outils numériques interrogent ainsi la gouvernance des exploitations, en faisant émerger de nouveaux acteurs importants : l'information devient un « actif stratégique », ce qui donne une place importante aux acteurs de l'agroéquipement, aux scientifiques de la donnée, aux gestionnaires de données et, en général, aux sociétés de services capables de collecter, de traiter et de valoriser les données (*ibid.*).

Exigeantes en capital et en compétences, ces nouvelles technologies demandent aux agriculteurs de s'adapter et de réorganiser le travail et le capital de l'exploitation, soit en s'organisant collectivement par la mutualisation des moyens et des compétences, soit en faisant appel à des tiers par la délégation du travail (Jeanneaux, 2018), soit en recourant à des capitaux externes pour réaliser des investissements (Nguyen *et al.*, 2017).

Les agroholdings familiales

Une nouvelle forme de structure agricole émerge en Europe, à la fois familiale et capitaliste, qualifiée « d'exploitation agricole familiale sociétaire », de type « capitaliste familiale » ou de « holding familiale » (Hervieu et Purseigle, 2009 ; Nguyen et Purseigle, 2012). Hervieu et Purseigle (2009) observent leur développement en France (dans les Landes et le Bassin parisien), en Italie (dans la plaine du Pô) et en Allemagne de l'Est (dans les nouveaux *Länders*). Ces structures sont familiales en raison de leur capital, mais de type sociétaire dans leur organisation. Elles se rapprochent de l'agriculture « de firme ». Le travail et le capital de l'exploitation y sont dissociés (Hervieu et Purseigle, 2009). La logique de ces exploitations est patrimoniale, le capital et le foncier sont aux mains des membres de la famille élargie, qui possèdent des parts au sein de l'exploitation et perçoivent une rente ; la gestion de l'exploitation est généralement assurée par un seul représentant de la famille et des salariés (Nguyen et Purseigle, 2012). Ce fonctionnement peut être une solution pour des exploitations « difficilement transmissibles à un membre unique de la famille » « en raison de leur niveau élevé de capitalisation » (*ibid.*).

Ces agroholdings familiales ont des activités connexes et proposent des services aux exploitations voisines : « prestation de travaux agricoles, revente d'intrants, crédits fournisseurs et avance sur la récolte, stockage, conditionnement et transformation des produits », voire une gestion intégrale des exploitations, d'autant qu'elles disposent « d'une main-d'œuvre abondante et d'un parc de matériel suffisamment puissant » (*ibid.*). Elles sont dans une logique de « concentration productive » « reposant non seulement sur l'acquisition de terres [...] mais aussi sur des contrats de location, de production ou d'approvisionnement passés avec des exploitants voisins, ou encore des assolements en commun », leur permettant ainsi d'atteindre des assolements de plusieurs milliers d'hectares (*ibid.*).

L'agriculture de firme

Des structures de type « agroholding », « méga-fermes », « capitalistiques » ou « de firme » se développent, où l'agencement entre foncier, capital, travail et famille est revisité. Hermans *et al.* (2017) définissent une agroholding comme « une organisation agricole dont le bloc d'actions majoritaire est détenu par une société par actions ». Ces structures de firme ont d'autres caractéristiques propres qui les différencient de l'agriculture familiale : leur très grande taille de plusieurs milliers d'hectares, leur

caractère industriel (production de masse, équipement important, rationalisation), leur capacité d'intégration et de concentration de l'amont et de l'aval, leur organisation complexe avec une dissociation de la gestion opérationnelle et de la propriété et « une pluralité des centres de décisions » ainsi que leur capacité d'innovation, d'adaptation et d'anticipation (Purseigle *et al.*, 2017 ; Hermans *et al.*, 2017).

Dans ce type de structure, les facteurs de production sont fortement segmentés, avec le capital et le foncier qui appartiennent à des actionnaires, et la gestion opérationnelle et le travail qui sont délégués à une main-d'œuvre salariée. Les facteurs de production sont aussi mobiles puisque l'exploitation agricole peut faire l'objet de plusieurs ventes et rachats en peu de temps « si sa rentabilité à court terme est remise en cause » (Nguyen et Purseigle, 2012). Les propriétaires du capital peuvent être des firmes multinationales ou des fonds d'investissement à la recherche de rentabilité financière, ou encore des fonds souverains qui désirent sécuriser l'approvisionnement alimentaire de leur pays (Nguyen *et al.*, 2017 ; Hervieu et Purseigle, 2009). Purseigle *et al.* (2017) voient dans le développement de grandes entreprises de sous-traitance gérant intégralement des travaux, voire des exploitations entières, une forme d'agriculture de firme. Celles-ci sont capables de négocier directement avec l'amont et l'aval et participent à une forme de concentration foncière.

Néanmoins, ces exploitations sont fragiles. Elles peuvent avoir des difficultés à réaliser des bénéfices (Hermans *et al.*, 2017), notamment parce qu'elles sont trop concentrées sur les bénéfices à court terme pour les actionnaires au détriment de stratégies de long terme centrées sur la production (Kuns *et al.*, 2016). De plus, elles sont peu ancrées dans leur territoire et font l'objet de controverses du fait de leur caractère industriel et de leurs impacts négatifs sur le territoire (Nguyen et Purseigle, 2012).

Une implication des acteurs territoriaux et des consommateurs dans la gouvernance des structures

Lamine *et al.* (2019) observent qu'en Europe, la transition de systèmes agroalimentaires territoriaux résulte d'actions combinées entre des agriculteurs, des acteurs de la société civile, des acteurs privés et des collectivités territoriales. Les agriculteurs sont alors englobés dans un processus plus large incluant les acteurs locaux et les consommateurs.

L'implication des consommateurs et des acteurs locaux peut se faire de différentes manières. Tout d'abord, au travers de la vente directe (marché de producteurs, boutique et cueillette à la ferme, etc.) où l'interaction directe entre le consommateur et le producteur permet d'établir une relation de confiance (Renting *et al.*, 2003). Ces relations directes peuvent s'élargir au travers de magasins de producteurs ou de marques régionales soutenues par des acteurs locaux, déjà évoqués plus haut. Les mouvements d'agriculture à soutien collectif (CSA, pour *community supported agriculture* en anglais) tel que les associations pour le maintien d'une agriculture paysanne (AMAP) se sont aussi beaucoup développés depuis les années 2000 en Europe

(Urgenci, 2016). Malgré la diversité des formes de CSA en Europe, on peut définir ces organisations comme « un partenariat direct entre un groupe de consommateurs et un ou plusieurs producteurs dans lequel les risques, les responsabilités et les bénéfices des activités agricoles sont partagés par le biais d'accords de long terme » (*ibid.*).

Certains agriculteurs développent aussi des activités de diversification telles que la gestion des paysages et l'agritourisme (Renting *et al.*, 2003), qui concernent, de fait, les acteurs locaux. Enfin, ces derniers (des particuliers, des collectivités territoriales ou des acteurs intermédiaires de la filière agricole) peuvent participer à l'achat de terres agricoles afin de favoriser l'accès au foncier pour des agriculteurs. Généralement, ces projets permettent l'installation de jeunes agriculteurs afin de revitaliser des territoires agricoles ou de développer des pratiques respectueuses de l'environnement. C'est le cas, par exemple, au sein du réseau Terres de liens en France (Nguyen *et al.*, 2017).

Au travers de ces exemples, il apparaît que les consommateurs et les acteurs locaux sont parfois partie prenante de la gouvernance de l'exploitation, et peuvent influencer les décisions qui y sont prises sur l'usage des facteurs de production.

I Les microscénarios d'évolution des structures des exploitations agricoles en Europe en 2050

À partir des hypothèses sur les types de structures agricoles et la distribution des structures en Europe en 2050 présentées dans le tableau 3.1, trois microscénarios d'évolution possible des structures agricoles en 2050 ont été élaborés afin de couvrir les futurs possibles des structures agricoles.

Microscénario 1 : une spécialisation et une financiarisation des structures coexistant avec des structures familiales résiduelles

En 2050, les structures agricoles se sont financiarisées et spécialisées. Dans un contexte de mondialisation de l'économie, de grandes firmes agricoles (de plusieurs milliers d'hectares), financées par des capitaux externes provenant d'investisseurs ou d'actionnaires, concentrent les terres agricoles. Dans ces firmes, les facteurs de production sont segmentés et mobiles. Les capitaux proviennent d'investisseurs extérieurs, le travail est effectué par des salariés et la terre fait régulièrement l'objet de locations, de ventes et de rachats d'une firme à l'autre. La forte concentration productive des terres agricoles se fait aussi au travers de sociétés de gestion d'exploitations agricoles aux allures de firmes, celles-ci gèrent intégralement un grand nombre d'exploitations pour le compte de propriétaires. Ces sociétés ne possèdent pas de parc de machines, mais commandent des prestations à tout un réseau d'entreprises de service pour le compte de leurs clients. Ces exploitations répondent à une logique financière et spéculative, en cherchant une rentabilité économique de court terme. En 2050, elles s'insèrent dans des chaînes de valeur longues et standardisées, sur des marchés agricoles de matière première (les commodités). Constamment à la recherche de nouveaux marchés, elles peuvent investir

dans des secteurs particuliers, à forte rentabilité économique. Notamment, elles peuvent investir dans des zones périurbaines à proximité de grandes métropoles pour développer des productions orientées vers l’approvisionnement de consommateurs urbains. Ceci leur permet de répondre à la forte demande en produits frais et locaux de la part de cette population urbaine et d’intégrer un marché lucratif.

Néanmoins, en 2050, des petites exploitations familiales résiduelles coexistent à côté des structures de firmes. Ces exploitations familiales ont peu de moyens financiers pour se développer et restent de petite taille. Les actifs sur l’exploitation développent la pluriactivité en ayant un travail en dehors de l’exploitation familiale. En fonction de leur localisation, les exploitations familiales organisent des circuits courts pour commercialiser et mieux valoriser leurs produits.

En 2050, la coexistence de ces deux types de structure génère un paysage des structures très dual à l’échelle européenne, avec une forte concentration des terres dans des structures de firmes. Les exploitations de taille moyenne n’existent plus. Une forte spécialisation à la fois des exploitations et des régions agricoles, avec une concentration géographique des productions, existe également.

Tableau 3.1. Les hypothèses d’évolution correspondant au microscénario « Spécialisation et financiarisation des structures coexistant avec des structures agricoles familiales résiduelles »

Composantes	Hypothèses d’évolution en 2050				
Gouvernance des structures agricoles	Gouvernance par des investisseurs financiers – logique actionnariale	Gouvernance par des firmes agroindustrielles (standards, labels)	Gouvernance par des organisations collectives d’agriculteurs (coopératives, structures mutualisées)	Gouvernance partagée avec des acteurs parties prenantes ou des consommateurs	Gouvernance familiale
Segmentation des facteurs de production (terre, capital, travail)	Unité des facteurs de production	Externalisation du travail	Agroholding familiale – hybridation des facteurs de production	Agriculture de firme – segmentation et mobilité des facteurs de production	
Distribution des structures en Europe	Organisation duale des structures agricoles et spécialisation régionale dans l’UE	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l’échelle régionale	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l’échelle de l’exploitation		

Les hypothèses sélectionnées sont présentées sur fond gris foncé. UE : Union européenne.

Microscénario 2 : une diversité régionale des structures agricoles

Depuis 2024, les limites rencontrées par la spécialisation régionale ont poussé les acteurs des chaînes de valeur à impulser une diversification des filières à l'intérieur des grandes régions européennes. En 2050, on observe une hétérogénéité des structures et une diversité des productions dans les régions, mais chaque structure reste, pour autant, fortement spécialisée.

Les distributeurs, les transformateurs et les coopératives ont organisé des filières régionales, notamment au travers de contrats, de standards et de labels. La mise en place de ces filières a amené les exploitations à se positionner sur des productions différentes à l'intérieur d'une même région et à s'y spécialiser, tout en gardant un noyau familial.

En 2050, plusieurs types d'exploitations coexistent dans les régions. Les plus grandes exploitations sont des agroholdings familiales où le capital est majoritairement familial, la gouvernance actionnariale (chaque membre de la famille possède des parts) et la gestion de l'exploitation assurée par un membre de la famille ou un salarié, tandis que les travaux sont effectués par des salariés. Ces structures agricoles ont des volumes de production importants, ce qui leur permet d'être directement en contact avec les transformateurs et les distributeurs.

À côté de ces agroholding familiales, des exploitations familiales persistent. Elles peuvent être de grande taille, mais aussi de taille moyenne et de petite taille. Les exploitations de grande et moyenne taille sont spécialisées et intégrées dans des coopératives. Les coopératives sont restées des acteurs clés en 2050, faisant le lien entre les exploitations agricoles et les transformateurs et les distributeurs. De taille importante, elles fonctionnent comme des entreprises privées. Les chefs d'exploitation familiale ont fréquemment recours à des prestataires de services. Cette délégation leur permet, soit de se recentrer sur une activité créatrice de valeur ajoutée (par exemple, sur des activités d'élevage en déléguant entièrement les activités culturelles), soit de déléguer intégralement la gestion de leur exploitation afin de se consacrer à d'autres activités rémunératrices en dehors de leur exploitation. Les plus petites exploitations sont résiduelles, et non liées aux coopératives.

L'ensemble des structures d'exploitations agricoles à l'échelle européenne est organisé de manière ternaire : des exploitations de petite, moyenne et grande taille coexistent dans les mêmes régions. Cependant, même s'il y a une pluralité d'orientations technico-économiques à l'intérieur d'une même région, et donc une moindre spécialisation régionale (par rapport à 2024), les exploitations agricoles restent pour la plupart très spécialisées.

Tableau 3.2. Les hypothèses d'évolution composant le microscénario « Diversité régionale des structures agricoles »

Composantes		Hypothèses d'évolution en 2050			
Gouvernance des structures agricoles	Gouvernance par des investisseurs financiers – logique actionnariale	Gouvernance par des firmes agroindustrielles (standards, labels)	Gouvernance par des organisations collectives d'agriculteurs (coopératives, structures mutualisées)	Gouvernance partagée avec des acteurs parties prenantes ou des consommateurs	Gouvernance familiale
Segmentation des facteurs de production (terre, capital, travail)	Unité des facteurs de production	Externalisation du travail	Agroholding familiale – hybridation des facteurs de production	Agriculture de firme – segmentation et mobilité des facteurs de production	
Distribution des structures en Europe	Organisation duale des structures agricoles et spécialisation régionale dans l'UE	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l'échelle régionale	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l'échelle de l'exploitation		

Les hypothèses sélectionnées sont présentées sur fond gris foncé. UE : Union européenne.

Microscénario 3 : une territorialisation et une diversification des structures agricoles

En 2050, les structures agricoles sont imbriquées avec les acteurs et les activités de leur territoire.

Depuis 2024, elles se sont organisées pour répondre à des enjeux divers portés par les acteurs du territoire : l'alimentation locale, la protection de la biodiversité, du paysage et du patrimoine, la qualité de vie et la santé des riverains. En 2050, les exploitations sont restées principalement familiales, la concentration des terres est limitée et l'installation de nouveaux exploitants a été facilitée, particulièrement sur de petites surfaces. Les exploitations sont diverses sur un même territoire : de petite, moyenne et grande tailles. C'est notamment au travers de laboratoires vivants que les exploitations agricoles locales ont développé une gouvernance partagée impliquant les acteurs du territoire.

Afin de répondre aux divers enjeux territoriaux, les exploitations agricoles ont diversifié leurs productions. Elles se sont organisées aussi collectivement, notamment en coopératives de petites tailles où les décisions sont prises de manière collective, ou en organisations de producteurs mettant en place des signes de qualité ou d'origine. Cette organisation collective s'est aussi faite au travers de la mutualisation d'équipements (pour limiter les coûts d'investissement), de services, de terres et de partage

d'expériences. Certaines de ces exploitations, particulièrement les plus grandes, délèguent une partie du travail effectué sur l'exploitation.

La production agricole est principalement valorisée au travers de circuits courts et longs. Les résidents, les consommateurs et les acteurs locaux sont impliqués dans la gouvernance des chaînes de valeur, en particulier dans les circuits courts, mais également dans les chaînes de valeur longues où les exploitations agricoles restent ancrées dans le territoire afin de répondre à ses divers enjeux.

Tableau 3.3. Les hypothèses composant le microscénario « Territorialisation et diversification des structures agricoles »

Composantes	Hypothèses d'évolution en 2050				
Gouvernance des structures agricoles	Gouvernance par des investisseurs financiers – logique actionnariale	Gouvernance par des firmes agroindustrielles (standards, labels)	Gouvernance par des organisations collectives d'agriculteurs (coopératives, structures mutualisées)	Gouvernance partagée avec des acteurs parties prenantes ou des consommateurs	Gouvernance familiale
Segmentation des facteurs de production (terre, capital, travail)	Unité des facteurs de production	Externalisation du travail	Agroholding familiale – hybridation des facteurs de production	Agriculture de firme – segmentation et mobilité des facteurs de production	
Distribution des structures en Europe	Organisation duale des structures agricoles et spécialisation régionale dans l'UE	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l'échelle régionale	Organisation ternaire des structures agricoles et rediversification à l'échelle de l'exploitation		

Les hypothèses sélectionnées sont présentées sur fond gris foncé. UE : Union européenne.

2. Les agroéquipements et les technologies numériques pour des systèmes agricoles sans pesticides chimiques en 2050

Mora O.

Cette section présente les hypothèses de changement en 2050 pour les équipements agricoles et les technologies numériques. Il s'agit de répondre à la question suivante : quel type d'équipements agricoles et de technologies numériques est-il nécessaire de développer à l'horizon 2050 pour construire des systèmes de culture sans pesticides chimiques ?

Cette section débute par une brève revue de la littérature scientifique et des rapports, destinée à identifier les tendances et les domaines de changement dans les agro-équipements et les technologies numériques. La seconde partie de la section présente les hypothèses de changement pour les agro-équipements et les technologies numériques en 2050. Ces hypothèses sont le résultat d'un atelier d'une journée avec un groupe d'experts sur les agro-équipements et les technologies numériques qui a discuté des tendances identifiées et a ensuite élaboré des hypothèses de changement en 2050.

■ Les transformations des agroéquipements et des technologies numériques pour des systèmes agricoles sans pesticides chimiques

Dans un premier temps, une analyse a été menée pour identifier les principales transformations des agro-équipements et des technologies numériques susceptibles de participer à la mise en œuvre de systèmes agricoles sans pesticides chimiques en 2050. Trois domaines ont été identifiés.

Les dispositifs d'observation et de modélisation

Le premier domaine renvoie aux dispositifs d'observation et de modélisation conçus pour suivre et anticiper la présence de bioagresseurs et la santé des plantes (Reboud *et al.*, 2022 ; Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Il s'agit d'outils d'observation, tels que des capteurs, des drones, des outils de télédétection, des dispositifs participatifs de production de données (recueil d'observations individuelles par l'intermédiaire d'une plate-forme numérique, *crowdsourcing* en anglais), ainsi que des outils de gestion de données permettant notamment l'interopérabilité des données, le croisement des sources et la spatialisation des données (Klerkx *et al.*, 2019 ; Machwitz *et al.*, 2021). Ensuite, les outils de modélisation et de simulation s'appuient sur les données massives, l'apprentissage profond ou des modélisations mécanistes pour anticiper la présence future de bioagresseurs (Reboud *et al.*, 2022 ; Klompenburg *et al.*, 2020).

Les agroéquipements spécifiques

Le deuxième domaine concerne les agro-équipements spécifiques adaptés à des systèmes de culture sans pesticides chimiques (Schnebelin *et al.*, 2021 ; Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Il s'agit du développement, en cours, d'agro-équipements adaptés aux nouveaux itinéraires culturaux (par exemple, le mélange des cultures) ou visant à réduire la compaction des sols, d'agro-équipements de précision pour l'application de produits de biocontrôle, et de l'autonomisation des équipements allant jusqu'à leur autonomie complète, à travers le développement de robots (Keller et Or, 2022 ; Rose *et al.*, 2021 ; Duckett *et al.*, 2018 ; Lenain *et al.*, 2021 ; Bergerman *et al.*, 2016 ; Bournigal, 2014).

Les dynamiques d'innovation

Le troisième domaine concerne les dynamiques d'innovation qui définissent l'usage de ces équipements et technologies. Pour être pertinente pour l'agriculteur-utilisateur,

l'innovation doit être co-construite entre une multitude d'acteurs, des agriculteurs aux équipementiers, en passant par les acteurs locaux (Salembier *et al.*, 2020 ; Toffolini *et al.* 2021). Les données doivent être générées et traitées à une échelle supra-exploitation agricole, ce qui plaide pour une mutualisation des données ainsi que pour leur gestion ouverte (Rizzo *et al.*, 2020). La gestion et le traitement des données, jusqu'à la modélisation et la diffusion des résultats, peuvent également être co-construits. Enfin, le coût et la spécialisation des équipements plaident pour des logiques d'usage collectif (Lucas et Gasselin, 2016 ; Tourdonnet *et al.*, 2018). Des défis majeurs en matière d'innovation émergent en lien notamment avec les structures agricoles, tels que les capacités d'investissement des agriculteurs, l'impact de l'innovation sur le travail agricole, la place des compétences des agriculteurs au regard de ce qui est délégué aux technologies (automatisation et robotisation), ou encore le partage et la propriété des données générées par les pratiques des agriculteurs, mais également la durabilité de ces technologies en matière de consommation d'énergie et de ressources (Rose *et al.*, 2021 ; Rizzo *et al.*, 2020 ; Nguyen *et al.*, 2020 ; Klerkx et Rose, 2020).

■ Trois microscénarios d'agroéquipements et de technologies numériques pour des systèmes agricoles sans pesticides chimiques

Sur la base de l'analyse synthétique présentée précédemment, trois microscénarios de changement des agroéquipements et des technologies numériques en 2050 ont été construites en croisant des hypothèses d'évolution des trois domaines présentés ci-dessus. Les membres du groupe d'experts « Agroéquipements et technologies numériques » qui a élaboré les microscénarios de changement à long terme pour les agroéquipements et les technologies numériques en vue de la mise en œuvre de systèmes de culture sans pesticides sont précisés dans le tableau A.6.

Le tableau 3.4 présente trois visions contrastées de la relation avec les techniques des agriculteurs qui privilégient des approches centrées soit sur l'adaptation modulaire des équipements au système de culture, soit sur la mutualisation des données et des équipements à grande échelle (paysage), soit encore sur l'autonomie des machines (robotisation) et le traitement individualisé des plantes.

Microscénario 1 : modularité des équipements pour leur adaptation aux pratiques

En 2050, les équipements agricoles et les technologies numériques sont modulaires et adaptables aux nouveaux systèmes de culture sans pesticides chimiques. Le développement d'une architecture d'équipements modulaires permet à l'agriculteur de combiner et d'adapter les agroéquipements en tenant compte des spécificités de son système de culture (par exemple, les cultures associées). Cette stratégie vise à résoudre les problèmes liés à l'impact des véhicules agricoles les plus lourds sur le compactage du sol et des équipements agricoles les plus grands sur l'augmentation de la

taille des parcelles (et des exploitations), ainsi qu'à inverser l'approche descendante classique de l'innovation en construisant des machines plus petites et modulaires.

L'équipement modulaire peut mobiliser une automatisation limitée des équipements, mais les décisions de l'agriculteur restent au centre de la gestion du système de culture. Les agriculteurs mobilisent des moyens d'observation tels que des capteurs, des instruments de télédétection, la production participative de données (partage des observations directes), des systèmes de modélisation et des modèles prédictifs conçus pour suivre et anticiper la présence de ravageurs et l'état de santé des plantes.

Tableau 3.4. Les microscénarios de changement des agroéquipements et technologies numériques en 2050 pour des systèmes agricoles sans pesticides chimiques

Microscénario en 2050	Modularité des équipements pour leur adaptation aux pratiques	Mutualisation des équipements, capteurs et données à l'échelle des paysages ou des organisations d'acteurs	Robots autonomes pour agir sur chaque plante
Dispositifs d'observation et de modélisation	Réseaux de capteurs, satellites et échantillons avec couplage des données Données spatialisées et séries temporelles longues Modélisation prédictive	Réseaux de capteurs, satellites et échantillons avec couplage des données Données spatialisées et séries temporelles longues Modélisation prédictive Phénotypage Outils de visualisation	Réseaux de capteurs, satellites et échantillons avec couplage des données Observation en temps réel au moyen de capteurs et drones Modélisation centrée sur les données Modélisation prédictive Phénotypage
Équipements spécifiques	Équipements adaptés aux nouveaux systèmes de culture (par exemple, cultures associées) Équipements modulables Automatisation (sans autonomie) des équipements avec capteurs	Partage des équipements Conception d'équipements orientés partage Stratégie pour réduire les risques à l'échelle des paysages Automatisation : périmètre de la délégation des pratiques aux équipements avec capteurs	Automatisation avec autonomie : robotisation, essais de robots Dispositifs autonomes pour discriminer chaque plante dans la parcelle Délégation complète à la technologie
Dynamiques d'innovation	Laboratoire vivant (<i>living lab</i> en anglais) et tiers lieux (expérimentation) Conception de briques technologiques pour la modularité et l'adaptation, mais aussi pour traiter les enjeux de filière : traçabilité et transformation post-récolte Organisation multiacteurs, à l'échelle des filières	Innovation ouverte avec données ouvertes et interopérabilité Conception de briques technologiques pour l'interopérabilité et la coopération Fourniture de services Organisations à l'échelle des paysages ou des territoires, ou organisations d'acteurs	Rôle des acteurs intermédiaires (équipementier) Enjeux réglementaires liés au travail agricole, à la consommation énergétique, à la société

L'agroéquipement modulaire a été développé dans des espaces tels que des laboratoires vivants ou des tiers lieux qui permettent la co-conception et l'expérimentation d'équipements, et impliquent une diversité d'acteurs de la chaîne de valeur. Ce principe de conception de blocs technologiques pour la modularité et l'adaptation est porté au-delà de l'exploitation agricole pour répondre également à des enjeux industriels (par exemple, la traçabilité et la transformation post-récolte).

Microscénario 2 : mutualisation des équipements, capteurs et données à l'échelle des paysages ou des organisations d'acteurs

Ce microscénario est basé sur le partage des données, des capteurs et des outils de modélisation pour comprendre les dynamiques spatiales des bioagresseurs, ainsi que la mutualisation des équipements afin d'intervenir à l'échelle de l'exploitation agricole et au-delà. Le partage des équipements agricoles est ancré dans une organisation spécifique au niveau du paysage ou basé sur des organisations préexistantes d'acteurs. La conception des équipements est orientée vers le partage, mais les machines peuvent inclure une part de délégation des pratiques agricoles à des équipements autonomes dotés de capteurs, tels que les robots compagons.

Le partage des équipements répond à un enjeu stratégique de réduction des risques à l'échelle du paysage. L'organisation collective autour des équipements vise à collecter, partager et coupler des données diverses issues de capteurs, de télédétection, de drones, d'échantillonnage, de production participative de données, ainsi qu'à utiliser les données pour des outils de modélisation prédictive, de phénotypage et de visualisation qui sont conçus pour suivre et anticiper la présence de bioagresseurs et l'état de santé des plantes. La production et le traitement de données à l'échelle supra-agricole nécessitent le partage, la gestion et l'interopérabilité des données.

Ces innovations en matière d'agroéquipement ont été co-construites dans le cadre d'un processus d'innovation ouverte impliquant une multitude d'acteurs, des agriculteurs aux fabricants d'équipements, en passant par les acteurs parties prenantes du territoire. Outre l'organisation collective, le partage et la propriété des données générées par les pratiques des agriculteurs ont constitué un enjeu majeur. Les blocs technologiques des machines agricoles sont conçus pour l'interopérabilité et la coopération. Enfin, les agriculteurs s'appuient sur des organisations collectives ou des organisations d'acteurs pour la fourniture de divers services de conseil et de gestion des cultures.

Microscénario 3 : robots autonomes pour agir sur chaque plante

Dans ce microscénario, des systèmes autonomes (des robots) développent des actions sur chaque plante à l'intérieur de la parcelle. Ce microscénario implique principalement des acteurs intermédiaires de l'agroéquipement, tels que les fabricants d'équipements, dans la conception et la fabrication de robots et d'essaims de robots reliés à des dispositifs de surveillance et d'anticipation.

En 2050, les décisions de l'agriculteur sont entièrement déléguées à la technologie qui articule l'automatisation et l'autonomie. Des outils autonomes distinguent les différentes plantes cultivées dans la parcelle. À l'aide d'une vaste base de données issue de l'observation en temps réel par des capteurs, de données provenant de drones, de la télédétection et d'échantillons prélevés, sur laquelle se développe une modélisation prédictive, les robots mettent en œuvre un traitement individualisé de chaque plante.

Cette innovation est issue d'un processus d'innovation descendante piloté par les fabricants d'agroéquipements, incluant les utilisateurs finaux (c'est-à-dire les agriculteurs). La mise en œuvre de ces innovations par les agriculteurs a nécessité un fort investissement de leur part, laissant de nombreux agriculteurs de côté. De plus, des questions sociétales et réglementaires majeures ont été soulevées lors de leur mise en place concernant la concurrence des robots avec le travail humain, le bilan énergétique des technologies numériques, et les préoccupations sociétales concernant les drones et les robots autonomes.

3. Des chaînes de valeur pour une agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Paresys L., Mora O., Berne J.-A., Meunier C.

Élaborer des scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050 nécessite non seulement de prendre en compte les systèmes de culture et les structures agricoles, mais aussi d'envisager des changements en aval des chaînes de valeur alimentaires. Cela implique de s'interroger sur les perceptions et comportements des consommateurs qui vont motiver les achats d'aliments exempts de pesticides chimiques, sur la gouvernance et l'organisation des activités à l'intérieur des chaînes de valeur alimentaires, sur l'information donnée aux consommateurs au sujet des aliments sans pesticides chimiques, ainsi que sur les moyens de stocker et de conserver les aliments sans utiliser de pesticides et de conservateurs chimiques.

Dans cette section, nous explorons donc les tendances et les signaux faibles afin d'élaborer des hypothèses d'évolution sur ces variables à l'horizon 2050 (la liste des experts consultés est disponible dans le tableau A.10). Enfin, nous élaborons des microscénarios de chaînes de valeur pour l'agriculture et l'alimentation sans pesticides chimiques en 2050, qui combinent des hypothèses d'évolution cohérentes entre elles.

■ Les comportements d'achat et de consommation alimentaires

Selon le dernier Eurobaromètre, les Européens donnent la priorité au goût, à la sécurité sanitaire et au coût lorsqu'ils achètent des produits alimentaires, devant les questions de durabilité (EC, 2020e). Les aliments « durables » sont pour les consommateurs principalement associés à la nutrition et à la santé (EC, 2020e ; tableau 3.5), qui sont des éléments importants d'influence des choix alimentaires, et qui motivent

Tableau 3.5. Principales caractéristiques d'un aliment « durable » selon les consommateurs européens

Un aliment est durable quand	Pourcentage des réponses
Il est nutritif et sain.	41
Il a été produit avec peu ou pas de pesticides.	32
Il est accessible à tous.	29
Il provient de « chaînes de valeurs courtes ou locales ».	24
Il a « peu d'impact sur l'environnement et le climat ».	22
Il utilise un minimum d'emballages, pas ou peu de plastiques.	20
Il répond à des standards élevés de bien-être animal.	20
Il garantit le respect des droits des travailleurs, la santé et la sécurité, et une rémunération équitable.	19
Il est bio.	18
Il est faiblement transformé, traditionnel.	18
Il assure un revenu équitable aux travailleurs.	16
Il est disponible.	10
Autre	0
Je ne sais pas	1

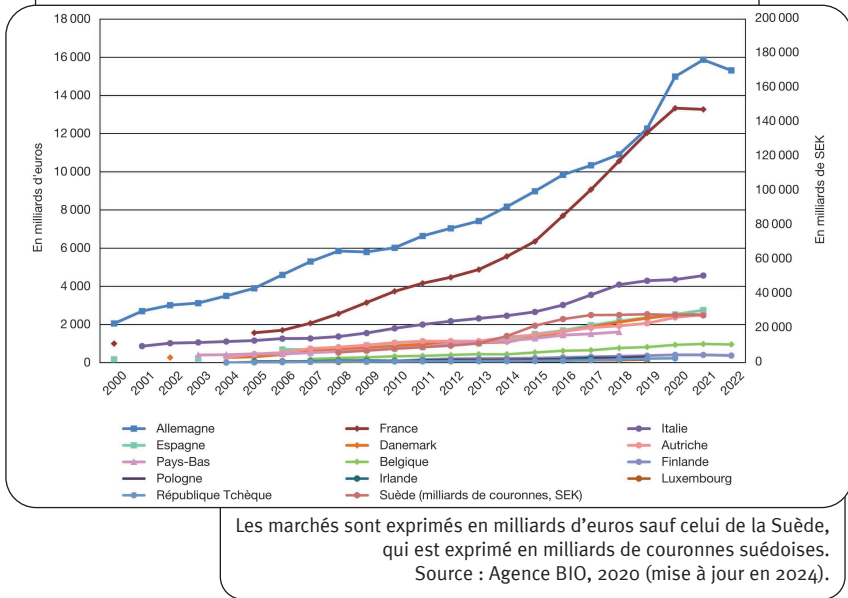
Le tableau présente les réponses aux questions : « laquelle de ces caractéristiques considérez-vous comme la plus importante pour un aliment *durable* ? Premièrement ? Et ensuite ? ». Un maximum de trois réponses étaient permises.
Source : EC, 2020e.

les consommateurs à choisir des aliments étiquetés « sans additifs ni ingrédients artificiels », « naturels » ou « issus de l'agriculture biologique » (Asioli *et al.*, 2017). Les aliments « durables » sont également associés dans l'esprit des consommateurs européens à une utilisation faible ou nulle de pesticides, à un prix abordable et, en particulier dans les pays d'Europe du Nord, à des chaînes de valeur locales ou courtes, ainsi qu'à un faible impact sur l'environnement ou le climat (EC, 2020e).

On observe également en Europe une tendance à la hausse de la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique depuis 2000, bien que la consommation semble avoir atteint un plateau dans certains pays, par exemple en Suède (EC, 2019b ; Willer *et al.*, 2009 ; figure 3.3).

De plus, et bien que le terme *local* ne soit pas bien défini, l'intérêt croissant pour les aliments produits localement est une tendance de consommation bien établie, intensifiée par la pandémie de Covid-19, et susceptible de continuer à croître selon plusieurs auteurs (Service de recherche du parlement européen, 2016 ; Feldmann et Hamm, 2015 ; Hobbs, 2020 ; Muresan *et al.*, 2021). Cet intérêt croissant s'explique par les perceptions associées aux produits alimentaires locaux : (i) des normes de qualité plus élevées et correspondant à une alimentation saine ; (ii) des méthodes

Figure 3.3. Évolution des principaux marchés d'agriculture biologique de l'Union européenne



de production plus respectueuses de l'environnement ; (iii) un contact direct avec les producteurs ; (iv) la connaissance de la provenance des aliments ; et (v) le soutien de l'agriculture et de l'économie locales par l'achat de denrées alimentaires à un prix équitable (Service de recherche du parlement européen, 2016).

En parallèle, la recherche de praticité est un autre facteur majeur qui influe sur les choix alimentaires des Européens (Asioli *et al.*, 2017) et, dans le sens de cette tendance, on observe une augmentation des achats en ligne de produits alimentaires depuis 2007 dans l'Union européenne (EC, 2020e), ainsi que des achats d'aliments ultratransformés (Vandevijvere *et al.*, 2019). Par exemple, en Suède, entre 1960 et 2010, la consommation d'aliments ultratransformés et transformés a augmenté de 142 % et 116 % respectivement, tandis que la consommation d'ingrédients culinaires transformés et d'aliments peu ou non transformés a diminué de 34 et 2 % respectivement (Juul et Hemmingsson, 2015).

Enfin, plusieurs études sur la consommation en Europe montrent une augmentation de la part des régimes végétaliens et végétariens dans les pays européens (Medawar *et al.*, 2019). L'International panel of experts on sustainable food systems (IPES-Food) et ETC Group (2021) indiquent que 11,5 % de la population allemande est végétalienne ou végétarienne, avec une augmentation de plus de 800 000 personnes par an, et estiment que, si cette tendance se poursuit, d'ici 2045, 42 % des Allemands auront un régime alimentaire à base de produits végétaux.

En s'appuyant sur ces éléments de tendances et signaux faibles, trois hypothèses d'évolution des achats alimentaires en 2050 ont été produites :

- « Des aliments produits sans utilisation de pesticides chimiques répondant à une norme de sécurité sanitaire des aliments. » Selon cette hypothèse, en 2050, les consommateurs achètent des aliments produits sans utilisation de pesticides chimiques, car ils sont conscients des risques pour la santé associés aux résidus de pesticides. L'absence de pesticides chimiques est devenue une norme de sécurité sanitaire des aliments, tout comme l'est aujourd'hui l'absence de contamination par certaines bactéries.
- « Des aliments sains dans un régime alimentaire sain. » Selon cette hypothèse, en 2050, les consommateurs consomment des aliments sans pesticides chimiques pour protéger leur santé, mais leurs préoccupations ne se limitent pas à ce seul critère et incluent (i) la consommation d'aliments sains (par exemple, ils évitent de consommer des aliments ultratransformés) ; et (ii) un régime alimentaire sain, c'est-à-dire diversifié et équilibré (avec plus de fruits, de légumes, de légumineuses, de noix et de céréales complètes, et moins d'aliments d'origine animale, de sucres libres, de graisses et de sel).
- « Une alimentation qui préserve la santé humaine et environnementale (y compris la biodiversité). » Selon cette hypothèse, en 2050, les préoccupations des consommateurs vont bien au-delà de leur propre santé. Elles englobent également la santé environnementale et la préservation de la biodiversité. Pour répondre à ces préoccupations, les consommateurs consomment des aliments issus d'une agriculture sans pesticides chimiques, mais aussi ayant un impact environnemental plus faible.

I Gouvernance et organisation de la chaîne de valeur

Les chaînes de valeur alimentaires comprennent les activités de stockage, de transformation, de vente, de consommation et d'élimination ou de réutilisation, et impliquent des flux de matières et d'informations (Ingram, 2019). En Europe, une grande diversité de chaînes de valeur alimentaires coexistent. Elles peuvent être caractérisées par leur couverture géographique (mondiale ou locale), le nombre d'intermédiaires entre les producteurs et les consommateurs (chaîne longue ou courte), les normes de production des produits alimentaires (par exemple, conventionnelles ou issues de l'agriculture biologique), le niveau de confiance et d'engagement envers la chaîne et l'asymétrie de pouvoir entre les acteurs des chaînes de valeur alimentaires (Gaitán-Cremaschi *et al.*, 2019 ; Lee *et al.*, 2012), ainsi que les valeurs (y compris les valeurs sociales, environnementales et économiques) sur lesquelles elles sont fondées (van der Ploeg *et al.*, 2019).

À l'échelle mondiale et en Europe, la tendance générale est que les entreprises fusionnent à tous les niveaux des chaînes de valeur alimentaires, s'emparant de parts de marché de plus en plus importantes et créant des entreprises de plus en plus grandes dans les secteurs de la transformation et de la distribution (Howard,

2021 ; IPES-Food, 2017). Certaines entreprises s'emparent même de terres agricoles (IPES-Food & ETC Group, 2021), y compris dans des pays européens comme la France (Leclair, 2022). En 2011, les cinq plus grandes entreprises de la grande distribution dans 13 États membres détenaient une part de marché de plus de 60 % dans le domaine alimentaire (EC, 2014).

En parallèle, la composition des paniers alimentaires est devenue de plus en plus standardisée depuis les années 1960, à l'échelle mondiale et en Europe.

Des pertes et gaspillages alimentaires considérables se produisent tout au long de la chaîne de valeur, et sont estimés à 270 kg par habitant et par an de la production à la consommation en Europe (Secondi *et al.*, 2015 ; Moller *et al.*, 2019).

Implication de la grande distribution

Pour se différencier auprès des consommateurs, les enseignes de la grande distribution fixent des normes privées sur des critères sanitaires et environnementaux, allant au-delà des normes conventionnelles, mais en deçà ou équivalentes aux exigences en agriculture biologique. Elles en répercutent potentiellement les coûts sur les producteurs en aval de la chaîne. Dans le même temps, les distributeurs spécialisés de produits biologiques fixent des normes allant au-delà des exigences en agriculture biologique. Par exemple, en France, Biocoop vend des produits sans arômes chimiques ou « naturels » alors que les produits issus de l'agriculture biologique peuvent contenir jusqu'à 5 % d'ingrédients non biologiques (Biocoop, 2018).

Les enseignes de la grande distribution sont également fortement impliquées dans la commercialisation des produits biologiques (Agence BIO, 2020), possédant leur marque propre de ces produits (Agence BIO, 2020), et soutenant les agriculteurs avec des contrats à plus long terme qui fixent à l'avance les volumes et les prix d'achat, ainsi que des prix favorables pendant les années de conversion (Carrefour, 2019).

Implication des entreprises agroalimentaires

Sous la pression des consommateurs et des distributeurs (Moller *et al.*, 2019), les entreprises agroalimentaires fixent des cahiers des charges privés plus stricts et des normes de production plus élevées, avec un soutien conditionné aux agriculteurs. Par exemple, dans la région de Vittel, Nestlé conditionne l'accès aux terres à des clauses environnementales incluant la non-utilisation de pesticides chimiques (Lavocat, 2021). En Italie, Mulino Bianco a défini une charte pour la culture durable du blé tendre (Barilla, 2020) et soutient les agriculteurs dans la mise en œuvre des pratiques définies avec des prix à la production adaptés tenant compte des coûts et avantages locaux (Blasi *et al.*, 2019).

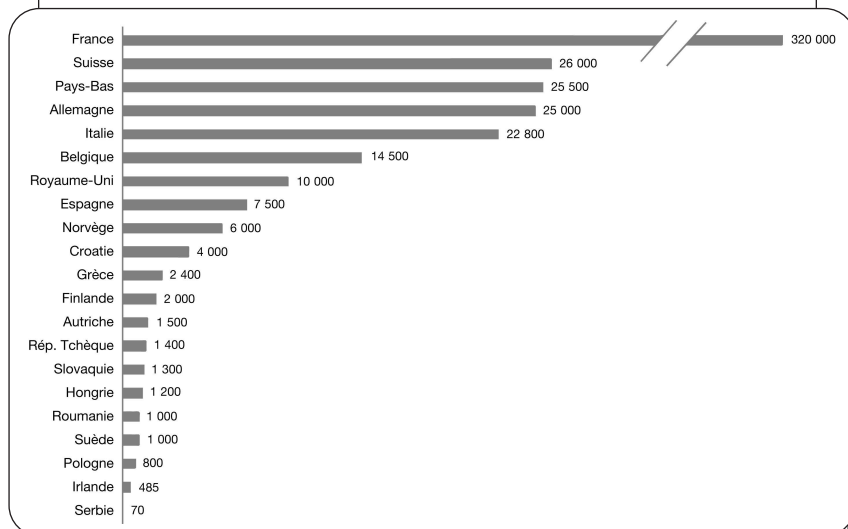
En Europe, les chaînes de valeur alimentaires sont également composées de 290 000 petites et moyennes entreprises (PME), qui représentent 99 % du nombre d'entreprises et emploient 58 % des salariés du secteur (Food Drink Europe, 2020).

Les PME locales peuvent jouer un rôle important dans les chaînes de valeur sans pesticides chimiques, car elles sont capables de traiter de petits volumes de produits locaux diversifiés, de les transformer localement et d'accroître le niveau de confiance et d'engagement envers la chaîne (Bliss *et al.*, 2019).

Implication des consommateurs

Certains consommateurs, de plus en plus soucieux de l'empreinte environnementale, sociale et économique de leurs achats alimentaires, soutiennent les chaînes de valeur courtes et locales, par des achats directs et des partenariats avec les agriculteurs. Le nombre de consommateurs impliqués dans l'agriculture à soutien collectif de type AMAP est en augmentation (URGENCI, 2016 ; figure 3.4), bien que les achats directs ne représentent qu'environ 2 % du marché des produits alimentaires frais en volume (EC, 2015).

Figure 3.4. Estimation du nombre de consommateurs de produits issus de l'agriculture à soutien collectif dans différents pays européens en 2016



Source : Urgenci, 2016.

Les plates-formes en ligne : nouveaux acteurs des chaînes de valeur

Les consommateurs achètent de plus en plus de produits alimentaires en ligne et la pandémie de Covid-19 a intensifié cette tendance (Hillen, 2021 ; Hobbs, 2020). Les plates-formes de vente en ligne sont de nouveaux intermédiaires à l'intérieur des

chaînes de valeur, avec des caractéristiques différentes, notamment des normes de production, des réseaux de distribution et des modèles et pratiques économiques (Rosol et Barbosa, 2021). Les plates-formes relient les producteurs et les consommateurs, ou les distributeurs et les consommateurs. Certaines d'entre elles sont axées sur les producteurs régionaux et à petite échelle (par exemple, Harvie, Farmigo, La Ruhe qui dit Oui!, Locavor) ; d'autres comme Amazon sont d'envergure internationale.

Selon une récente étude prospective sur l'avenir des achats alimentaires en ligne (Ruffieux et Level, 2024), les plates-formes pourraient évoluer vers : (i) des plates-formes centrées sur les prix bas ; (ii) des plates-formes communautaires (adaptant les produits aux communautés et à leurs valeurs, ce qui se traduit par des chaînes de valeur fragmentées) ; (iii) des plates-formes de personnalisation (utilisant l'intelligence artificielle pour adapter les produits aux consommateurs) ; et (iv) des plates-formes d'engagement (utilisant une stratégie pour accompagner les consommateurs dans des achats alimentaires responsables, avec des changements parfois difficiles et coûteux). Ces hypothèses se distinguent par la manière dont (i) les aliments sont produits ; (ii) les aliments sont adaptés aux consommateurs et livrés (parcours clients) ; (iii) les aliments sont consommés (valeurs associées à l'alimentation) ; et (iv) les chaînes de valeur sont réglementées.

À partir de ces tendances et signaux faibles, quatre hypothèses d'évolution dans la gouvernance et l'organisation des chaînes de valeur alimentaires en 2050 ont été imaginées :

- « Collaborations entre producteurs ou coopératives, distributeurs et consommateurs. » Selon cette hypothèse, en 2050, la gouvernance des chaînes de valeur est partagée entre les différents acteurs de la chaîne, par le biais de partenariats et de contrats. Les partenaires partagent une vision et des valeurs associées à l'alimentation. Ces partenariats permettent (i) de renforcer la confiance dans les aliments, (ii) de partager les risques associés à la production d'aliments sans pesticides chimiques, et (iii) de mieux coordonner les activités, de partager les connaissances et de coupler les innovations tout au long de la chaîne.
- « Proximité entre les producteurs et les consommateurs par le biais de plates-formes ou de contacts directs. » Selon cette hypothèse, les producteurs agricoles et les consommateurs interagissent par le biais de plates-formes ou de contacts directs. Cette proximité permet d'instaurer la confiance et de partager les risques entre les producteurs et les consommateurs.
- « Distributeurs et consommateurs. » Selon cette hypothèse, ce sont les acteurs de la grande distribution qui régissent les chaînes de valeur. Ils contrôlent l'approvisionnement alimentaire, mais peuvent être influencés par la pression des consommateurs. Ils tentent toutefois de répondre aux préoccupations des consommateurs tout en maintenant leur position de pouvoir à l'intérieur des chaînes de valeur.
- « Industrie agroalimentaire et grande distribution (y compris les plates-formes). » Selon cette hypothèse, la gouvernance des chaînes de valeur est partagée entre ces deux grands acteurs puissants, qui travaillent en étroite collaboration pour contrôler l'offre alimentaire et influencer la demande.

■ L'information fournie aux consommateurs

Les récents scandales alimentaires ont renforcé la méfiance des consommateurs et leur besoin d'une plus grande transparence et d'informations sur les aliments (Asioli *et al.*, 2017 ; Azzurra *et al.*, 2019 ; Feldmann et Hamm, 2015 ; Meneses *et al.*, 2014).

Différents moyens d'informer, d'accompagner ou d'influencer les consommateurs ont été développés ou sont en cours de développement par différents acteurs, que ce soit des organisations de la société civile, des acteurs publics et privés. On trouve parmi ces outils d'information les labels, indications apposées sur les aliments pour indiquer qu'ils ont des qualités particulières (Brice et Mallard, 2020). Les informations fournies sur les étiquettes se présentent sous diverses formes (textes, feux tricolores, logos et images), sur la face avant ou arrière des emballages (Asioli *et al.*, 2017 ; Cecchini et Warin, 2016). Ils sont censés donner aux consommateurs la possibilité de prendre en compte, entre autres, les aspects nutritionnels (par exemple, le Nutri-Score), environnementaux (par exemple, la production biologique), éthiques (par exemple, le commerce équitable), géographiques (par exemple, les appellations d'origine protégée) lors du choix des aliments (Asioli *et al.*, 2017 ; Cecchini et Warin, 2016 ; Flinzberger *et al.*, 2022 ; Grunert *et al.*, 2014 ; Janssen et Hamm, 2012). Les organisations de la société civile mettent en avant les écarts entre les objectifs déclarés des labels et leurs impacts réels, et recommandent de développer des labels fondés sur les données scientifiques disponibles (Basic *et al.*, 2021 ; UFC-Que Choisir, 2021a). De plus, le nombre croissant de labels sur les aliments peut être source de confusion et susciter la méfiance des consommateurs (Basic *et al.*, 2021 ; Busch, 2020 ; Grunert *et al.*, 2014 ; Janssen et Hamm, 2012 ; Maruyama *et al.*, 2021). Les chercheurs soulignent également l'absence de définitions juridiques et de réglementations pour certains labels (Asioli *et al.*, 2017 ; Maruyama *et al.*, 2021) et l'image trompeuse qu'ils peuvent donner (Ketelsen *et al.*, 2020). Pour tenter de résoudre ce problème et rendre le cadre réglementaire actuel plus strict, la Commission européenne (EC), dans le cadre de la stratégie « De la ferme à la table », a prévu d'examiner les moyens de créer un cadre législatif sur les indications de durabilité des produits alimentaires. Ce cadre couvrirait la fourniture d'informations aux consommateurs sur les aspects nutritionnels, climatiques, environnementaux et sociaux des produits alimentaires (EC, 2020a).

Au-delà des labels présents sur les emballages alimentaires, les progrès récents en matière de technologie et de communication ont permis le développement d'applications mobiles, parmi lesquelles les applications alimentaires, dont le nombre augmente en même temps que l'intérêt des consommateurs (Flaherty *et al.*, 2017 ; Joosse et Hrcs, 2015 ; Schumer *et al.*, 2018 ; Tosi *et al.*, 2021). Certaines applications sont destinées à évaluer les produits alimentaires sur la base d'un seul ou de plusieurs critères, par exemple la qualité nutritionnelle, l'acceptabilité des additifs, le degré de transformation ou l'impact des produits alimentaires sur l'environnement (Open Food Facts, 2022 ; Siga, 2021 ; UFC-Que Choisir, 2021b). Certains permettent une approche personnalisée de l'alimentation, posant la question de la gestion de la confidentialité et

de la sécurité des données personnelles (Flaherty *et al.*, 2017 ; IPES-Food & ETC Group, 2021 ; Schumer *et al.*, 2018). D'autres fournissent des services de géolocalisation sur les lieux d'approvisionnement locaux ou régionaux (Joosse et Hracs, 2015). D'autres encore visent à réduire le gaspillage alimentaire (Harvey *et al.*, 2020 ; Vo-Thanh *et al.*, 2021).

Les informations peuvent être véhiculées par différentes sources : privées, publiques, participatives, ou encore plus récemment, la *blockchain*. La technologie *blockchain* s'annonce très prometteuse dans le contexte où les chaînes de valeur alimentaires impliquent de nombreux intermédiaires entre les producteurs et les consommateurs, avec un enjeu de restaurer la confiance de ces derniers (Astill *et al.*, 2019 ; Dasaklis *et al.*, 2022 ; Feng *et al.*, 2020 ; Kamilaris *et al.*, 2019). Une *blockchain* est un grand livre de transactions numériques, public ou privé, tenu par un réseau de multiples machines informatiques (Kamilaris *et al.*, 2019). C'est un moyen d'effectuer des transactions numériques automatisées et fiables (IPES-Food & ETC Group, 2021) qui peut être utilisé pour enregistrer des données à différents niveaux à l'intérieur des chaînes de valeur alimentaires (Kamilaris *et al.*, 2019). La mise en œuvre de *blockchain* peut poursuivre différents objectifs : garantie de la sécurité sanitaire des aliments, soutien aux agriculteurs, vérification du respect des normes, traçabilité de l'origine des aliments, ou encore réduction des déchets (*ibid.*).

Sur la base des tendances et signaux faibles concernant l'information des consommateurs, cinq hypothèses d'évolution à l'horizon 2050 ont été formulées :

- « Applications web détenues par des tierces parties », dans lesquelles les données relatives à la traçabilité des pratiques le long des chaînes de valeur alimentaires sont présentées aux consommateurs, par le biais par exemple de *blockchains* ;
- « Labels », basés sur des données scientifiques (par exemple, le label « produit respectueux de la biodiversité ») et sur les impacts réels des produits plutôt que sur des objectifs déclarés ;
- « Suivi collaboratif des impacts des aliments » par les acteurs des chaînes de valeur alimentaires et les consommateurs ;
- « Campagnes » d'information sur les aliments, financées par les pouvoirs publics pour améliorer les connaissances des consommateurs ;
- Information fournie par l'intermédiaire d'une « plate-forme détenue par la grande distribution », qui possède et traite les données brutes fournies par les différents acteurs de la chaîne.

■ Les technologies pour trier, stocker, transformer et conserver les aliments

Après la récolte, les pesticides peuvent être utilisés pendant le stockage des matières premières agricoles, afin d'éviter leur contamination par des bioagresseurs (insectes notamment). Selon les associations professionnelles européennes des céréales Cocal, Euromaisiers, Euromalt et Unistock, en 2018, « dans les silos des opérateurs,

la principale option pour gérer l'infestation par les insectes est la circulation de l'air (59 % des répondants), puis la fumigation (52 % des répondants), suivie par les insecticides de stockage (45 % des répondants) » (Coceral *et al.*, 2018). Des solutions pour éviter l'utilisation de pesticides lors du stockage des grains sont étudiées dans la littérature, notamment l'intérêt de combiner différentes méthodes, telles que les températures élevées et basses, l'enlèvement des impuretés, l'application de phéromones, de terre de diatomée et de composés naturels provenant de diverses plantes, ainsi que de gaz inertes, de prédateurs et de parasites (Hamel *et al.*, 2020). Palou *et al.* (2015) suggèrent d'adopter une gestion intégrée des bioagresseurs, de la ferme à la table.

Historiquement, la transformation des aliments joue un rôle clé pour prolonger leur durée de conservation et la possibilité de les transporter, et ainsi éviter les pertes alimentaires (Asioli *et al.*, 2017 ; Meneses *et al.*, 2014). L'industrie alimentaire utilise plusieurs moyens pour conserver les aliments. Par exemple, la fermentation, employée depuis des millénaires et qui connaît actuellement un regain d'intérêt. Il s'agit d'un processus naturel au cours duquel l'activité biologique des micro-organismes produit une série de métabolites, qui peuvent à leur tour supprimer la croissance ou la survie de micro-organismes indésirables dans les produits alimentaires (Ross *et al.*, 2002). Le développement de nouvelles techniques de caractérisation des micro-organismes et des communautés microbiennes (approches métagénomiques, métagénomique) offre de nouvelles possibilités de mieux connaître les microbiomes tout au long de la chaîne alimentaire et de concevoir des méthodes de conservation des aliments (Yap *et al.*, 2022).

L'industrie alimentaire peut également utiliser des additifs conservateurs, intentionnellement ajoutés aux aliments pour les protéger de la détérioration biologique (Erickson et Doyle, 2017). Bien que leur sécurité soit évaluée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa), leur utilisation dans les produits alimentaires a suscité certaines inquiétudes (Carocho *et al.*, 2014 ; Erickson et Doyle, 2017 ; Anses, 2022), ce qui a conduit les consommateurs à rechercher des produits revendiquant l'absence de conservateurs. L'industrie alimentaire travaille à réduire ou à supprimer progressivement l'utilisation d'additifs alimentaires, y compris de conservateurs. Selon une étude menée par l'Observatoire français de l'alimentation (Oqali) sur plus de 30 000 produits, entre 2008-2012 et entre 2010-2016, l'utilisation d'additifs dans les produits transformés a globalement diminué. Parmi les vingt catégories pour lesquelles des données d'évolution sont disponibles, le nombre d'aliments sans additifs est passé de 13,7 % à 18,3 % des produits depuis le début des années 2010 (Oqali, 2019).

Pour remplacer les conservateurs, plusieurs technologies ont été mises au point pour empêcher la propagation des agents pathogènes tout au long de la chaîne alimentaire. Par exemple, l'industrie alimentaire utilise des ingrédients antimicrobiens « naturels » comme les huiles essentielles ou les extraits de plantes (Calo *et al.*, 2015 ; Erickson et Doyle, 2017) comme substituts aux additifs nitrités dans les charcuteries. Le remplacement des conservateurs passe aussi par l'utilisation de nouveaux emballages pour une transformation minimale des aliments, tels que les emballages aseptiques,

les emballages sous atmosphère contrôlée ou modifiée, les emballages actifs (avec des activités antimicrobiennes), et les films et enrobages comestibles biosourcés et biodégradables (Alzamora *et al.*, 2015 ; Janjarasskul et Suppakul, 2018 ; Mari *et al.*, 2016 ; Maurya *et al.*, 2021 ; Nguyen Van Long *et al.*, 2016 ; Palou *et al.*, 2016, 2015 ; Sivakumar et Bautista-Baños, 2014 ; Wińska *et al.*, 2019 ; Zhang *et al.*, 2018).

Enfin, en combinant les progrès de la logistique, de la gestion de la chaîne du froid et de l'emballage intelligent, les produits stockés pourraient être surveillés de près, et la durée de stockage mieux gérée pour passer du modèle « premier entré, premier sorti » au modèle « premier périmé, premier sorti » (Porat *et al.*, 2018 ; Parfitt *et al.*, 2010). Des stratégies permettent d'utiliser des fruits et légumes de qualité inférieure. Par exemple pour la cuisson, la cuisson à l'étouffée et la préparation de jus pourraient être développées.

Sur la base de ces tendances et signaux faibles, trois hypothèses d'évolution des technologies pour la conservation des aliments ont été imaginées en 2050 :

- « Gestion des microbiomes » des aliments pour conserver les aliments tout au long de la chaîne de valeur ;
- « Transformation minimale combinée avec le contrôle biologique » incluant les nouveaux emballages, et avec une meilleure organisation de la logistique entre récolte et consommation ;
- « Procédés de transformation agiles », adaptés à l'hétérogénéité des produits.

■ Microscénarios de chaînes de valeur alimentaires sans pesticides chimiques

En combinant les différentes hypothèses formulées dans les paragraphes précédents, nous avons construit trois microscénarios de chaînes de valeur alimentaires en 2050, pour une agriculture sans pesticides chimiques (tableau 3.6).

Microscénario 1 : approvisionnement en aliments sans pesticides comme standard de sécurité alimentaire (chaîne de valeur globale)

En 2050, les consommateurs, conscients des risques pour la santé liés aux résidus de pesticides dans les aliments, achètent des aliments sans pesticides chimiques. Les aliments sans pesticides sont donc devenus une norme de sécurité sanitaire des aliments sur le marché européen. Les chaînes de valeur mondiales sont dominantes et intégrées verticalement. Elles sont régies principalement par des entreprises de la grande distribution, qui ont étendu leur pouvoir : elles contrôlent les différentes étapes des chaînes de valeur alimentaires, de la production à l'approvisionnement en intrants (semences, produits chimiques, etc.), à la logistique, à la transformation et à la consommation. Elles ont un accès monopolistique aux données, et les utilisent pour optimiser la production. Les informations sur les aliments sont fournies par l'intermédiaire des plates-formes gérées par les distributeurs. Les pesticides

et les conservateurs chimiques n'étant plus utilisés, les produits alimentaires sont hétérogènes en ce qui concerne leur quantité et leur qualité ; les entreprises agroalimentaires et les distributeurs disposent de moyens suffisants pour adapter leurs processus de transformation et optimiser les conditions de stockage et de conservation.

Microscénario 2 : approvisionnement en aliments sains pour un régime sain (local et global)

En 2050, les consommateurs ont adopté une alimentation saine, diversifiée et équilibrée. Ils ne consomment que des aliments sans pesticides chimiques, évitent de consommer des aliments ultratransformés, d'origine animale, trop sucrés, gras, et consomment plus de fruits, de légumes, de légumineuses, de noix et de céréales complètes. Les partenariats avec les acteurs des chaînes de valeur (producteurs et coopératives, transformateurs, distributeurs) permettent d'instaurer un climat de confiance. Les autorités et les organisations de consommateurs accompagnent les consommateurs dans leurs choix par le biais de campagnes d'information et de sites Web de tiers. Les aliments sont fournis par des chaînes de valeur locales, nationales, européennes ou mondiales. Les risques associés à la production d'aliments sans pesticides chimiques sont partagés tout au long des chaînes de valeur. Les activités sont mieux coordonnées, les connaissances sont partagées et les innovations sont couplées le long des chaînes de valeur pour traiter des produits alimentaires hétérogènes. Les aliments sont conservés grâce à une surveillance et une gestion étroites du microbiome alimentaire de la ferme à la table.

Microscénario 3 : approvisionnement en aliments préservant la santé humaine et environnementale et fournissant des paysages diversifiés

En 2050, la société civile se préoccupe à la fois de la santé humaine et de la santé environnementale, et en particulier de la préservation de la biodiversité. La consommation d'aliments sans pesticides chimiques répond à ces deux préoccupations. Une diversité de chaînes de valeur traitant d'une diversité de cultures est ancrée dans les territoires et les petites régions. La proximité géographique de la production et de la transformation des aliments ainsi que les partenariats avec les acteurs des chaînes de valeur (producteurs et coopératives, transformateurs, distributeurs) permettent d'instaurer la confiance dans les produits alimentaires. Les données relatives à l'impact réel des aliments sur l'environnement, y compris sur la biodiversité, sont collectées par différents acteurs et résumées sous forme de labels. Les acteurs interagissent et collaborent à différents niveaux des chaînes de valeur, tant verticalement, c'est-à-dire des producteurs aux consommateurs ; qu'horizontalement, c'est-à-dire des producteurs aux producteurs, des chaînes de valeur des cultures aux chaînes de valeur de l'élevage. La logistique est adaptée à la diversification des cultures et à la saisonnalité des produits. Il y a une meilleure adéquation entre la récolte et la consommation, et donc moins de besoins de stockage et de conservation des aliments.

Tableau 3.6. Résumé des hypothèses d'évolution à horizon 2050 correspondant aux microscénarios de la chaîne de valeur alimentaire

Hypothèses d'évolution en 2050			
	Des aliments produits sans utilisation de pesticides chimiques répondant à une norme de sécurité sanitaire des aliments	Des aliments sains dans un régime alimentaire sain	Une alimentation qui préserve la santé humaine et environnementale (y compris la biodiversité)
Valeurs et choix alimentaires	Des aliments produits sans utilisation de pesticides chimiques répondant à une norme de sécurité sanitaire des aliments	Des aliments sains dans un régime alimentaire sain	Une alimentation qui préserve la santé humaine et environnementale (y compris la biodiversité)
Gouvernance et organisation des chaînes de valeur	Collaborations entre producteurs ou coopératives, distributeurs et consommateurs	Proximité entre les producteurs et les consommateurs par le biais de plates-formes ou de contacts directs	Distributeurs et consommateurs
Information des consommateurs	Applications Web détenues par des tierces parties, dans lesquelles les données relatives à la traçabilité des pratiques le long des chaînes de valeur alimentaires sont présentées aux consommateurs, par le biais par exemple de <i>blockchains</i>	Labels basés sur des données scientifiques (par exemple label « produit respectueux de la biodiversité ») et sur les impacts réels des produits déclarés	Industrie agroalimentaire et grande distribution (y compris les plates-formes) Campagnes d'information sur les aliments financées par les pouvoirs publics pour améliorer les connaissances des consommateurs
Technologies pour trier, stocker, transformer et conserver les aliments	Gestion des microbiomes des aliments pour conserver les aliments tout au long de la chaîne de valeur	Transformation minimale combinée avec le contrôle biologique incluant les nouveaux emballages, et avec une meilleure organisation de la logistique entre récolte et consommation	Information fournie par l'intermédiaire d'une plate-forme détenue par la grande distribution, qui possède et traite les données brutes fournies par les différents acteurs de la chaîne
Échelle spatiale des chaînes de valeur alimentaires	Chaînes de valeur territorialisées, diversifiées et en circuit court, en lien avec la diversification des cultures et des paysages (coordination et synergies)	Chaînes de valeur régionales (nationales, districts, régions autour des métropoles)	Chaînes de valeur globalisées

Microscénario 1 : [diagonal lines] ; Microscénario 2 : [diagonal lines] ; Microscénario 3 : [diagonal lines]

4. Les scénarios et les trajectoires de transition pour une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050

Les sections précédentes de l'ouvrage ont abouti à poser des microscénarios d'évolution des différentes composantes du système en 2050 en ce qui concerne les systèmes de culture, les structures d'exploitation, les agroéquipement et technologies numériques et les chaînes de valeur.

Dans la section 3 du chapitre 2, différents systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050 ont été conceptualisés, qui engagent différentes modalités d'interaction avec les milieux. Pour autant, ces systèmes de culture ont été à ce stade définis *in abstracto*, indépendamment de leur insertion dans un réseau sociotechnique constitué par des exploitations agricoles, un secteur amont de l'agriculture et un secteur aval. De la collecte à la consommation en passant par la transformation, le commerce et la distribution, ce secteur aval définit la nature, la destination et l'usage des produits issus de l'agriculture.

Afin de compléter cette première approche, nous avons examiné, dans les différentes sections du chapitre 3, les autres composantes du système décrivant une agriculture européenne sans pesticides chimiques, c'est-à-dire les exploitations agricoles, les agroéquipements et les technologies numériques ainsi que les chaînes de valeur. Il s'est agi de définir des évolutions possibles de ces composantes en 2050 qui seraient favorables à l'émergence d'une agriculture et d'un système alimentaire sans pesticides chimiques. Ce chapitre présente maintenant les scénarios élaborés et leurs trajectoires de transition, ainsi que les différentes actions (politiques publiques, systèmes de connaissance et d'innovation agricoles, évolution des régimes alimentaires) permettant d'accompagner ces transitions.

1. Scénarios et trajectoires de transition

Olivier O., Berne J.-A., Le Mouël C., Meunier C., Drouet J.-L.

Cette section présente les scénarios élaborés à partir de l'assemblage des microscénarios d'évolution décrits dans les chapitres précédents. Ils exposent ce que pourrait être une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050, ainsi que les trajectoires de transition pouvant y mener.

■ La logique de construction des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques

À partir des microscénarios élaborés séparément dans les sections précédentes, plusieurs images intégratives d'une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 ont été construites. La démarche de prospective qui a été mobilisée vise à reconstruire une représentation du système à l'horizon 2050 à partir de la somme de ses parties, en mobilisant un certain nombre d'hypothèses supplémentaires sur ce qui les relie. C'est une approche systémique qui positionne le système de culture sans pesticides à l'intérieur d'un tissu d'interrelations avec une multitude d'acteurs constituant le système alimentaire. L'objectif de cette approche est d'identifier les relations systémiques qui rendent possible une agriculture sans pesticides et ainsi, de définir ses conditions de possibilité. Ce point, important, mérite d'être explicité et approfondi par un détour par la théorie du réseau sociotechnique.

En ayant une conception connexionniste de l'innovation, la notion de réseau socio-technique (Callon, 1984 ; Latour, 2005) permet de dépasser une double aporie de la réflexion sur l'innovation vers une agriculture sans pesticides chimiques : celle qui consiste à imaginer, ou bien que les technologies agricoles pourraient seules produire une agriculture sans pesticides, ou bien qu'à l'inverse la transformation des chaînes de valeur et des marchés serait suffisante pour faire émerger une agriculture sans pesticides chimiques. Dans le réseau sociotechnique, le processus d'innovation engage l'ensemble des acteurs humains et non-humains dans une dynamique de construction mutuelle et d'entre-définition (Akrich, 1992 ; Latour, 2005). Les acteurs (ainsi que les techniques et les objets circulant entre eux) se construisent simultanément au travers d'ajustements réciproques (*ibid.*). Ainsi, par exemple, les particularités des systèmes de culture et des produits déterminent pour partie l'organisation des marchés (si l'on pense par exemple à la vente de fruits et légumes frais), tandis que les systèmes de culture n'existent qu'au travers des chaînes de valeur qui permettent à leurs produits d'atteindre le consommateur. Dans une approche systémique, nous assumons que le passage vers une agriculture sans pesticides chimiques nécessite une transformation simultanée et coordonnée de différents segments de la chaîne de valeur, ainsi que de la production agricole et du secteur amont de l'agriculture. Ce sont des transformations systémiques, de large ampleur, qui sont envisagées dans les scénarios que nous avons développés.

La fabrication des scénarios basée sur un tableau morphologique

Pour construire les scénarios, un dispositif a été mis en place qui comprend un tableau morphologique et s'appuie sur le comité d'experts européen de la prospective (tableau A.4).

Le tableau morphologique est un outil heuristique qui permet de définir une multiplicité de scénarios, de manière cohérente et comparable (Álvarez et Ritchey, 2015). Chaque ligne du tableau décrit les microscénarios d'évolution alternatifs d'une composante

du système en 2050. Ainsi, la combinaison de microscénarios d'évolution de chaque composante du système décrit un état du système en 2050 (tableau 4.1). Le tableau morphologique est une matrice décrivant tous les états du système en 2050 sous la forme de combinaisons de microscénarios d'évolution (élaborés aux étapes précédentes). Ainsi, il contient l'espace morphologique d'évolution du système, c'est-à-dire l'ensemble des états du système qui peuvent être générés à partir des paramètres du tableau (c'est-à-dire les microscénarios d'évolution). Cependant, dans cet espace morphologique, un très grand nombre d'états du système n'ont pas de sens, car ils présentent des formes incohérentes ou impossibles (*ibid.*).

Le tableau morphologique n'est qu'un moyen, un support de la réflexion ; et il faut ajouter les jugements des experts pour aboutir à des scénarios. En effet, tous les états du système générés aléatoirement ne sont pas également plausibles, certains ne produisent pas de sens. C'est l'expertise du groupe d'experts qui permet de sélectionner les combinaisons de microscénarios qui ont du sens (Ramirez et Selim, 2014). Il faut d'abord que le scénario ait une cohérence interne, c'est-à-dire que la combinaison des microscénarios ait une cohérence logique, et qu'ils ne soient pas contradictoires entre eux. Ensuite, il faut que le scénario soit plausible ; cela signifie qu'il existe des connaissances dans le présent qui peuvent constituer les prémisses d'un tel futur, et que les schémas de causalité et les hypothèses sous-jacentes sont vraisemblables (Mitter *et al.*, 2019). Les scénarios doivent être pertinents et créatifs au regard de la question posée à la prospective, notamment en proposant des perspectives nouvelles et originales (Amer, 2013). Enfin, ils ne doivent pas être de simples variations sur un même thème mais doivent être structurellement différents afin que leur diversité couvre le champ des évolutions possibles du système étudié (Amer, 2013).

La fabrication des trajectoires de transition par la méthode de *backcasting*

À partir de scénarios construits précédemment, nous avons identifié dans un premier temps, au moyen de différents groupes de travail, des hypothèses supplémentaires cohérentes avec les scénarios concernant les politiques publiques, les systèmes de connaissances et d'information en agriculture et l'éducation, ainsi que les changements de régime alimentaire. Il s'agissait d'imaginer des hypothèses portant sur des actions et des politiques publiques susceptibles d'accompagner une transition vers une (ou des) agriculture(s) sans pesticides chimiques (décrites dans la section 2 du chapitre 4).

Dans un second temps, en utilisant une méthode de rétropolation (*backcasting* en anglais ; annexe 1), des trajectoires de transition ont été élaborées par un groupe d'experts. Pour chaque scénario, une frise chronologique décrit le séquençage des actions à l'échelle européenne, leurs résultats, et les interactions entre les composantes du système tout au long d'une trajectoire allant d'aujourd'hui à 2050 (figures 4.1, 4.2, 4.3). Un récit de la trajectoire a été élaboré, présentant les étapes successives de transformation du système nécessaires pour arriver à une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050.

■ La sélection des microscénarios définissant les scénarios

La sélection des microscénarios, participant du scénario, est déterminante de son contenu. Cette sous-section décrit les choix de combinaisons de microscénarios qui ont présidé à la construction des trois scénarios à partir du tableau morphologique (tableaux 4.1, 4.2, 4.3).

Il s'agit d'abord de rappeler que tous les scénarios élaborés sont des scénarios dits *normatifs*, en ce sens qu'ils décrivent un état souhaitable que l'on cherche à atteindre en 2050 ; c'est-à-dire qu'ils décrivent en 2050 une agriculture européenne sans pesticides chimiques.

Les microscénarios concernant les chaînes de valeur ont été particulièrement importants dans la construction des scénarios, ils ont permis d'imaginer la manière dont certains usages alimentaires, c'est-à-dire une certaine demande alimentaire, allaient influencer la direction prise par le processus de transformation et permettre de faire émerger des systèmes agricoles sans pesticides chimiques. Les structures agricoles ont été considérées comme à la fois des résultantes des organisations de marché, mais aussi comme des contraintes ou des atouts pour une transition vers des systèmes de culture sans pesticides. De ce point de vue, nous avons sélectionné pour chaque scénario, les structures agricoles les plus cohérentes avec la logique du scénario. En ce qui concerne les systèmes de culture, plusieurs microscénarios ont été combinés pour un même scénario avec, chaque fois, un microscénario dominant et un ou deux microscénarios secondaires.

Trois scénarios sont ici sommairement esquissés à partir des combinaisons de microscénarios qui les sous-tendent. On précise à chaque fois, à partir des dires d'experts, la logique générale du scénario, les cohérences entre microscénarios dans le scénario et les contradictions entre microscénarios qui font qu'ils n'ont pas été retenus dans le scénario.

La combinaison de microscénarios du scénario 1

Le premier scénario est intitulé « des chaînes alimentaires mondiales et européennes basées sur les technologies numériques et l'immunité des plantes pour un marché alimentaire sans pesticides chimiques ».

La logique générale de ce scénario consiste à être basée sur des standards de marché qui garantissent que les produits sont issus d'une agriculture sans pesticides chimiques dans le cadre de chaînes de valeurs européennes et mondiales. C'est un scénario de forte concentration des acteurs économiques, fortement capitaliste et technologique, dominé par les principaux acteurs de la grande distribution ou de l'agroalimentaire ; une agriculture financiarisée et spécialisée mobilise la robotisation et des niveaux élevés d'intrants.

Dans la combinaison de microscénarios définie dans ce scénario, il y a d'abord une forte cohérence entre l'hypothèse de chaînes de valeur globale dominées par de grandes entreprises, et l'hyperspécialisation, l'agrandissement ainsi que la financiarisation des exploitations agricoles. La dynamique des systèmes agricoles est ici pilotée par les transformations des marchés alimentaires sous l'impulsion des consommateurs

Tableau 4.1. Microscénarios d'évolution sélectionnés pour construire le scénario 1 d'agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Chaîne de valeur alimentaire	Approvisionnement en aliments sans pesticides comme standard de sécurité alimentaire (chaîne de valeur globale)	Approvisionnement en aliments sains pour un régime sain (local et global)	Approvisionnement en aliments préservant la santé humaine et environnementale et fournissant des paysages diversifiés
Structures d'exploitation agricole	Spécialisation et financiarisation des structures d'exploitations avec une agriculture familiale résiduelle	Diversité régionale des structures d'exploitation	Territorialisation et diversification des structures d'exploitation
Systèmes de culture	Renforcement des défenses immunitaires des plantes cultivées	Gestion de l'holobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions entre plantes hôtes et micro-organismes	Conception de paysages complexes et diversifiés, adaptés aux contextes locaux et à leur évolution
Agroéquipements et technologies numériques	Robots autonomes agissant sur chaque plante	Mutualisation des équipements, des capteurs et des données (organisation collective)	Équipements modulaires s'adaptant à la spécificité des pratiques

Les microscénarios sélectionnés apparaissent en gris foncé et gris intermédiaire.

et des régulations mises en place par les autorités européennes. Il y a aussi une forte cohérence entre la spécialisation des exploitations, l'orientation vers des marchés, et le fait d'utiliser des technologies de pointe en faisant appel à des robots pour agir contre les bioagresseurs et en réduisant la main-d'œuvre sur l'exploitation. Les systèmes de culture mobilisent également un haut niveau d'intrants biologiques, avec des applications extrêmement ciblées.

Il y a une faible cohérence de ce scénario avec des microscénarios de dé-spécialisation des exploitations agricoles, étant donné que les dynamiques de standardisation et de globalisation des marchés ont tendance à entraîner une forte spécialisation régionale des exploitations. De plus, nous avons considéré que de petites et moyennes exploitations n'auraient pas des capacités financières suffisantes pour avoir accès aux agroéquipements de pointe (robots, suivi) envisagés dans ce scénario. Enfin, nous avons estimé qu'un tel scénario n'irait pas dans le sens de systèmes de culture basés sur une coordination territoriale forte pour la gestion des paysages, car l'innovation reste centrée sur la filière agroalimentaire et n'intègre pas (ou peu) les acteurs territoriaux.

La combinaison de microscénarios du scénario 2

Le deuxième scénario est intitulé « des chaînes alimentaires européennes basées sur les holobiontes des plantes, les microbiomes du sol et des aliments, pour des aliments et des régimes sains ».

Tableau 4.2. Microscénarios d'évolution sélectionnés pour construire le scénario 2 d'agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Chaîne de valeur alimentaire	Approvisionnement en aliments sans pesticides comme standard de sécurité alimentaire (chaîne de valeur globale)	Approvisionnement en aliments sains pour un régime sain (local et global)	Approvisionnement en aliments préservant la santé humaine et environnementale et fournissant des paysages diversifiés
Structures d'exploitation agricole	Spécialisation et financiarisation des structures d'exploitations avec une agriculture familiale résiduelle	Diversité régionale des structures d'exploitation	Territorialisation et diversification des structures d'exploitation
Systèmes de culture	Renforcement des défenses immunitaires des plantes cultivées	Gestion de l'hobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions entre plantes hôtes et micro-organismes	Conception de paysages complexes et diversifiés, adaptés aux contextes locaux et à leur évolution
Agroéquipements et technologies numériques	Robots autonomes agissant sur chaque plante	Mutualisation des équipements, des capteurs et des données (organisation collective)	Équipements modulaires s'adaptant à la spécificité des pratiques

Les microscénarios sélectionnés apparaissent en gris foncé et gris intermédiaire.

La logique de ce scénario est basée sur une demande pour une alimentation saine qui entraîne le développement de chaînes de valeur régionale et européenne n'utilisant aucun pesticide chimique. Ainsi, ce n'est pas seulement une agriculture sans pesticides qui est visée, mais aussi une chaîne alimentaire sans biocides. L'objectif d'une alimentation saine impacte l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, mobilise les coopératives, les transformateurs et les agriculteurs.

Dans ce scénario, la cohérence entre les microscénarios s'organise autour du suivi des microbiomes tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Les différents acteurs, agriculteurs, coopératives, transformateurs et distributeurs gardent une autonomie d'action, mais restent constamment liés autour de l'enjeu de la surveillance et du contrôle des microbiomes. Le microbiome et sa gestion font le lien entre le microscénario de chaînes de valeur orientées vers une alimentation saine et le microscénario de systèmes de culture basés sur la gestion de l'hobionte de la plante cultivée (qui, au moyen de la gestion de communautés microbiennes du sol, participe à l'immunité de la plante). Cependant, pour assurer une protection des cultures efficace, le système de culture s'appuie également sur une diversification des cultures à l'échelle de l'exploitation. Les équipements agricoles sont adaptés à la gestion des microbiomes du sol et à son suivi, tout comme les semences qui sont adaptées aux spécificités des parcelles.

Dans ce scénario, la concentration des acteurs est moins forte que dans le premier scénario. Ainsi, ce scénario n'est pas cohérent avec des marchés internationaux de

commodités présentant des coordinations *a minima* entre acteurs, ni avec le maintien d'une forte consommation de produits ultratransformés (le scénario nécessite un changement des régimes alimentaires). Ce scénario est cohérent avec une approche filière qui renforce la coordination des acteurs, avec un rôle important des coopératives ; et du fait de cette approche filière, il est donc moins cohérent avec une forte coordination territoriale pour une gestion des paysages. Enfin, ce scénario n'est pas cohérent avec une robotisation complète des cultures, car les connaissances et les technologies permettant *d'autonomiser* la surveillance et la gestion du microbiome du sol ne seront vraisemblablement pas disponibles en 2050.

La combinaison de microscénarios du scénario 3

Le troisième scénario est intitulé « des paysages complexes et diversifiés et des chaînes alimentaires régionales pour un système alimentaire européen une seule santé ».

Tableau 4.3. Microscénarios d'évolution sélectionnés pour construire le scénario 3 d'agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Chaîne de valeur alimentaire	Approvisionnement en aliments sans pesticides comme standard de sécurité alimentaire (chaîne de valeur globale)	Approvisionnement en aliments sains pour un régime sain (local et global)	Approvisionnement en aliments préservant la santé humaine et environnementale et fournissant des paysages diversifiés
Structures d'exploitation agricole	Spécialisation et financiarisation des structures d'exploitations avec une agriculture familiale résiduelle	Diversité régionale des structures d'exploitation	Territorialisation et diversification des structures d'exploitation
Systèmes de culture	Renforcement des défenses immunitaires des plantes cultivées	Gestion de l'holobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions entre plantes hôtes et micro-organismes	Conception de paysages complexes et diversifiés, adaptés aux contextes locaux et à leur évolution
Agroéquipements et technologies numériques	Robots autonomes agissant sur chaque plante	Mutualisation des équipements, des capteurs et des données (organisation collective)	Équipements modulaires s'adaptant à la spécificité des pratiques

Les microscénarios sélectionnés apparaissent en gris foncé et gris intermédiaire.

C'est un scénario qui repose sur une coordination territoriale répondant à deux objectifs : la gestion des paysages et des régulations biologiques ainsi qu'une relocalisation des chaînes de valeur pour approvisionner les consommateurs et les habitants en produits sains. Le système agricole s'appuie, pour la protection des cultures, sur le renforcement des régulations biologiques à l'échelle du paysage et du sol.

La cohérence des microscénarios s'organise autour du double objectif d'alimentation saine et de biodiversité, à une échelle territoriale. L'approche territoriale de diversification et de complexification des paysages est cohérente avec une approche des systèmes de culture qui renforce la diversité microbienne des sols et se soucie de la santé de l'holobionte cultivé. De plus, la recherche d'une complexification et de la diversification des paysages est cohérente avec (et passe pour partie par) des structures agricoles diversifiées qui génèrent des espaces variés. Elle est également cohérente avec des chaînes de valeurs territorialisées qui permettent de tisser des liens avec les consommateurs et de rendre sensible la relation entre le système agricole, les produits consommés, et l'écologie du paysage. Ce système de culture basé sur des régulations biologiques très localisées est cohérent avec une adaptation fine des agroéquipements au contexte local et au système de culture.

Ce scénario est peu compatible avec des chaînes de valeur engagées sur des marchés de produits globaux et déterritorialisés, qui rendent imperceptibles le lien entre les produits alimentaires consommés et leur impact sur les écosystèmes. Ce scénario est également peu compatible avec le maintien de fortes spécialisations régionales, qui conduisent à une simplification des paysages et donc à une réduction des régulations biologiques. Ce scénario est peu cohérent avec le maintien d'une spécialisation forte des exploitations qui limite les possibilités de diversification des cultures et de réassociation agriculture-élevage dans les systèmes de culture. Enfin, ce scénario est peu cohérent avec des systèmes de protection des cultures basés sur un usage important d'intrants externes pour renforcer l'immunité des plantes, car il s'agit avant tout de favoriser par des actions indirectes (rotation, habitat semi-naturel, association de culture, etc.) les régulations biologiques à l'échelle du paysage et des sols. Enfin, ce scénario est peu compatible avec une robotisation complète des activités agricoles, car un tel scénario nécessite des décisions multiples et spécifiques par l'agriculteur à l'échelle de la parcelle et du paysage, notamment en matière de compréhension des dynamiques des écosystèmes et d'adaptation constante des systèmes agricoles à la pression des bioagresseurs.

■ Les récits des scénarios et les trajectoires de transition vers une agriculture sans pesticides chimiques

À partir des squelettes de scénarios construits grâce au tableau morphologique, trois récits décrivant en 2050 une agriculture européenne sans pesticides ont été construits. Les récits des scénarios articulent les récits partiels (aussi appelés microscénarios) qui décrivent les états des différentes composantes du système en 2050 (présentés en fin de section 3 du chapitre 2, ainsi que dans le chapitre 3).

Chaque récit de scénario est suivi d'une trajectoire de transition permettant de parvenir à une agriculture et à un système alimentaire sans pesticides chimiques en 2050. Cette trajectoire est à la fois présentée sous la forme d'une représentation circulaire divisée en décades avec l'horizon final au centre et sous la forme d'un récit qui décrit le chemin de la transition.

Récit du scénario 1 (S1) : marché global

Le titre long du scénario 1 est « des chaînes alimentaires mondiales et européennes basées sur les technologies numériques et l'immunité des plantes pour un marché alimentaire sans pesticides chimiques ».

En 2050, les chaînes de valeur européennes et mondiales ont développé, en lien avec des exploitations spécialisées, des marchés alimentaires sans pesticides chimiques. La construction à l'échelle transnationale d'un marché alimentaire sans pesticides a été rendue possible par l'inclusion de standards de production sans pesticides chimiques dans les accords bilatéraux entre l'UE et ses partenaires commerciaux sur le modèle des clauses miroirs. Les exploitations agricoles ont évolué et développé des systèmes agricoles sans pesticides en mobilisant un niveau élevé de capitaux, d'intrants et de technologies pour lutter contre les bioagresseurs.

Les chaînes de valeur mondiales et européennes sont intégrées verticalement et principalement régies par les grands acteurs de la distribution et de la transformation. Leur pouvoir s'est accru depuis 2025 : ils contrôlent les différentes étapes de la chaîne de valeur alimentaire, depuis la production et la fourniture d'intrants (semences, intrants biologiques et équipements) jusqu'à la logistique. Les distributeurs et les transformateurs ont le monopole de l'accès aux données massives générées tout au long des chaînes de valeur. Ils utilisent ces données pour optimiser l'affectation des facteurs de production aux usages qu'ils jugent les plus utiles. Les informations sur les produits alimentaires issues des plates-formes de distribution et de vente leur permettent de suivre et d'influencer la demande alimentaire.

Les structures agricoles se sont spécialisées grâce à un accès à des capitaux externes (financiers) et des investissements importants dans les technologies. Sous la pression des chaînes de valeur alimentaire, elles ont développé de nouveaux systèmes de culture qui ne mobilisent pas de pesticides chimiques.

Dans les exploitations agricoles, les systèmes de culture reposent sur la surveillance des bioagresseurs et de l'environnement, les données massives, la robotisation et un niveau élevé d'intrants. La stratégie de protection des cultures est axée sur le renforcement de l'immunité de chaque plante cultivée en anticipant le développement des bioagresseurs et en mesurant l'état physiologique des plantes. Des systèmes autonomes (robots) agissent sur chaque plante. La protection des cultures s'adapte en permanence à l'évolution des menaces, en anticipant et en définissant à l'avance de nouvelles solutions prophylactiques pour renforcer l'immunité des plantes. Des outils autonomes distinguant les différentes plantes cultivées dans la parcelle, suivent l'état de santé de chaque plante et leur environnement biotique et abiotique. À l'aide d'une vaste base de données issue de l'observation en temps réel par des capteurs, de données provenant de drones, de la télédétection et d'échantillons prélevés, se développe une modélisation prédictive. Grâce à ces informations, des robots, des robots compagnons et des essaims de robots mettent en œuvre un traitement individualisé de chaque plante.

Les capacités immunitaires des plantes pour lutter contre les bioagresseurs ont été renforcées par la sélection de génotypes résistants aux bioagresseurs (gènes de résistance majeurs et mineurs conférant une résistance totale ou partielle) ou de mélanges variétaux et de porte-greffes (pour les plantes pérennes) tolérants aux bioagresseurs. L'immunité des plantes a été également renforcée par l'apport exogène de stimulateurs de défense des plantes, l'introduction de plantes de service qui produisent des stimulateurs de défense des plantes, et le renforcement des interactions biologiques par les différents microbiomes, dont le microbiome du sol.

Cette protection des cultures est complétée par une diversification des cultures ainsi qu'en raisonnant les espèces et les variétés cultivées. La gestion des adventices se fait en favorisant les interactions négatives des cultures sur les adventices par des mécanismes d'allélopathie et d'allélochimie, en préservant l'avantage concurrentiel des plantes cultivées pour leur accès aux ressources (par exemple, la lumière et les nutriments), et aussi, plus classiquement, en raisonnant la succession des cultures et les rotations. Il est désormais accepté que les systèmes de culture peuvent être maintenus avec des adventices endogènes aux parcelles cultivées. La gestion des ravageurs repose sur le contrôle de la taille des populations de ravageurs par des actions prophylactiques en utilisant le biocontrôle ou l'allélochimie (par exemple, l'émission de composés organiques volatils ou même la création de paysages olfactifs).

En conséquence, les structures agricoles produisant des produits sans pesticides ont été intégrées dans des chaînes de valeur longues et standardisées. De grandes firmes agricoles financées par des capitaux externes provenant d'investisseurs privés ou d'actionnaires, concentrent les terres agricoles. Dans ces firmes, les facteurs de production (terre, travail, capital) sont segmentés et mobiles. Un réseau d'entreprises proposant des prestations de service pour la protection des cultures s'est développé. De petites exploitations familiales résiduelles, avec des agriculteurs pluriactifs, coexistent avec ces structures de firmes. Disposant de peu de moyens financiers pour se développer, elles sont restées de petite taille. D'une manière générale, la spécialisation accrue des exploitations agricoles a conduit à un niveau élevé de concentration géographique des productions, avec certaines externalités négatives sur l'environnement.

Transition vers le scénario 1, marché global

Dans le scénario 1, le récit de la transition (figure 4.1) est basé sur trois hypothèses spécifiques concernant les politiques publiques, les systèmes de connaissance et d'innovation en agriculture et les régimes alimentaires (voir le détail des hypothèses dans la section 2 du chapitre 4) : une harmonisation globale des règles du commerce international interdisant l'usage de pesticides chimiques (politiques publiques) ; des systèmes de connaissance et d'innovation agricoles basés sur la gestion des données et la robotisation (AKIS) ; des régimes alimentaires au fil de l'eau (régimes alimentaires).

La transition vers des marchés alimentaires sans pesticides chimiques a été déclenchée par la création de standards privés d'agriculture sans pesticides, mis en place

par les acteurs des chaînes de valeurs (distributeurs et transformateurs). Cette orientation du marché répondait à une demande des consommateurs pour des aliments sans pesticides, fondée sur la prise de conscience et l'inquiétude vis-à-vis des risques pour la santé associés aux pesticides chimiques.

Les acteurs dominants des chaînes de valeur ont développé des contrats avec les agriculteurs qui octroient un supplément de prix à ceux qui mettent en place des systèmes sans pesticide ; ces contrats prennent également en charge les risques liés à la production agricole, notamment durant la période de transition de l'exploitation agricole. Pour accompagner la transition, l'UE a défini, vers 2025, un cadre réglementaire qui a fixé des règles communes pour l'usage d'allégations relatives aux « aliments sans pesticides chimiques » sur les étiquettes des produits alimentaires. Parallèlement, le marché européen sans pesticides s'est développé grâce à des accords bilatéraux négociés par l'UE avec des partenaires étrangers afin de créer des marchés de produits issus d'une agriculture sans pesticides. Ainsi, en 2035, 90 % des produits alimentaires vendus par les distributeurs dans l'UE étaient issus de pratiques agricoles sans pesticides chimiques. Après 2040, ces accords bilatéraux ont été remplacés par un standard commun sans pesticides chimiques pour les échanges internationaux de produits alimentaires fixé par l'Organisation mondiale du commerce et le *Codex alimentarius*¹⁶.

Pour accélérer la transition des exploitations agricoles, l'UE a mis en place une conditionnalité forte des aides directes du premier pilier de la PAC reliée au non-usage de pesticides chimiques. Après 2030, l'UE a établi une réglementation fixant des objectifs obligatoires de réduction de l'usage des pesticides pour tous les États membres, allant jusqu'à leur interdiction complète en 2040.

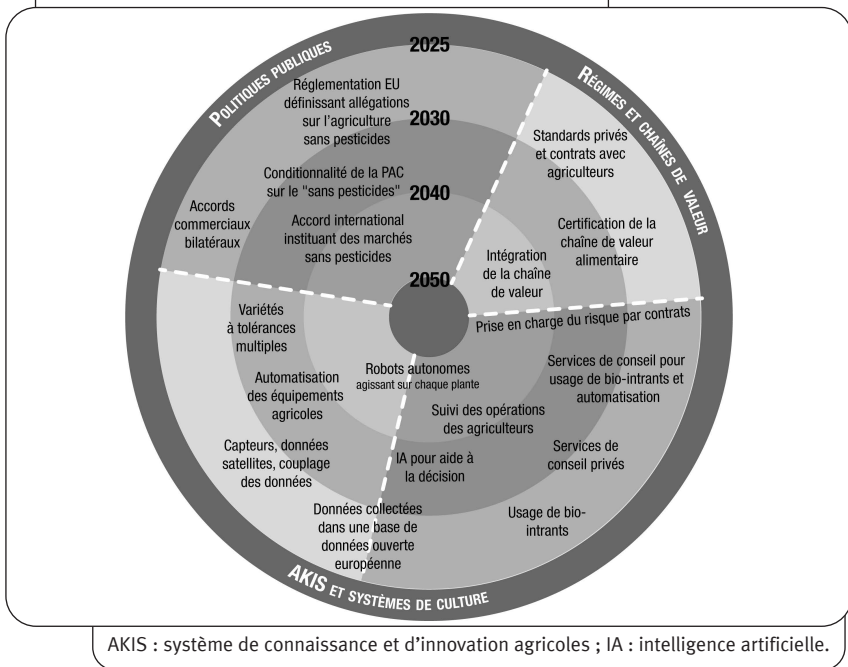
La première phase de la transition des agriculteurs s'est organisée autour de l'automatisation des équipements et de l'utilisation de bioproduits (stimulateurs de défense des plantes et biostimulants). La formation et les systèmes de connaissance et d'innovation agricoles ont accompagné la transition en organisant dans un premier temps la gestion et le traitement des données massives, puis dans un second temps, le déploiement de la robotisation. Les systèmes de connaissance et d'innovation sont gouvernés par de grands acteurs privés spécialistes de la collecte et du traitement de données. Ils ont développé des outils de suivi de l'environnement biotique et abiotique et de la santé des plantes, qui sont mobilisés par les agriculteurs qui investissent massivement dans les équipements numériques de protection des cultures. Des entreprises privées de services fournissent du conseil aux exploitations agricoles en utilisant l'intelligence artificielle pour l'aide à la décision, après 2030. Ces innovations sont issues d'un processus d'innovation descendant mené par les fabricants d'équipements en collaboration avec les utilisateurs finaux (c'est-à-dire les agriculteurs). Dans un second temps, après 2035, la robotisation et l'automatisation des équipements agricoles ont été déployées grâce à des investissements massifs des exploitations agricoles, en partie facilités par des

16. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/home/fr/>

aides publiques et des prêts bancaires, mais laissant de côté les petites exploitations. Ces innovations ont soulevé des questions réglementaires majeures liées à la propriété, à l'accès et à l'utilisation des données par des entreprises privées, à la concurrence des robots avec la main-d'œuvre humaine, au bilan énergétique des technologies numériques et aux préoccupations sociétales concernant la présence de drones et de robots autonomes dans les paysages ruraux.

Les structures agricoles en 2050 sont de plus en plus intégrées à la chaîne de valeur pour l'accès aux financements, aux marchés et aux données. Cependant, tout au long de la période de 2025 à 2050, les politiques européennes ont accompagné les conséquences de la transition sur les agriculteurs qui n'ont pu s'engager dans cette voie technologique, notamment en finançant la reconversion des agriculteurs, mais aussi en soutenant les systèmes agricoles diversifiés pour pallier les conséquences négatives de l'hyperspécialisation régionale.

Figure 4.1. Trajectoire de transition pour le scénario 1



Récit du scénario 2 (S2) : microbiomes sains

Le titre long du scénario 2 est « des chaînes alimentaires européennes basées sur les holobiontes des plantes, les microbiomes du sol et des aliments, pour des aliments et des régimes sains ».

En 2050, le système alimentaire européen fournit des aliments issus d'une agriculture sans pesticides chimiques et assure une alimentation saine, afin de préserver la santé humaine. Tout au long de la chaîne de valeur, les aliments sont préservés grâce à un suivi et une gestion fine du microbiome alimentaire, de la ferme à la table. Des processus de transformation minimale combinés à un contrôle biologique des produits sont privilégiés par rapport à l'utilisation d'additifs alimentaires chimiques (y compris les conservateurs) et de biocides. Dans les deux cas, la qualité et la valeur nutritionnelle des aliments sont préservées. Pleinement conscients des bienfaits d'une alimentation saine sur leur santé, les consommateurs ont développé des régimes alimentaires diversifiés. Ils ne consomment que des aliments produits sans pesticides chimiques, évitent de consommer des aliments ultratransformés, d'origine animale, trop sucrés, gras, et consomment plus de fruits, de légumes, de légumineuses, de noix et de céréales complètes.

Les distributeurs, les transformateurs et les coopératives ont organisé des filières régionales, notamment au travers de la création de certifications et de labels, en impulsant une diversification des filières à l'intérieur des grandes régions européennes. Les différents acteurs de la chaîne de valeur mobilisent les microbiomes des aliments pour traiter les enjeux de conservation aux différentes étapes : collecte, stockage, transport, transformation et distribution. Les structures d'exploitation se sont diversifiées à l'échelle des régions européennes, elles sont pilotées par des coopératives et s'insèrent dans des chaînes de valeur régionale, nationale, européenne. L'Europe est caractérisée par une diversité de production et une hétérogénéité de structures à l'intérieur d'une même région. Les cultures se sont diversifiées pour répondre à l'enjeu de diversification des régimes alimentaires.

En lien avec les chaînes de valeur alimentaires, les exploitations agricoles ont développé des systèmes de culture qui requièrent un niveau de compétences élevé pour le pilotage de la protection des cultures contre les bioagresseurs. La gestion des microbiomes, principalement du microbiome du sol, est essentielle pour protéger les cultures sans utiliser de pesticides chimiques. La protection des cultures basée sur l'holobionte (assemblage d'un hôte – la plante cultivée – et de ses communautés de micro-organismes associées) cherche à renforcer les fonctions du microbiote, à améliorer la protection des plantes et la résistance aux bioagresseurs, ainsi que l'adaptabilité de l'holobionte face aux perturbations biotiques ou abiotiques. Pour gérer l'holobionte des cultures, plusieurs leviers sont utilisés tels que la sélection variétale pour renforcer les interactions plante-microbiote chez les plantes cultivées (sélection basée sur un phénotype étendu), ou l'inoculation de micro-organismes clés. La gestion de l'holobionte des cultures repose principalement sur des pratiques culturelles

spécifiques qui modulent le microbiote, telles que le travail du sol, les amendements organiques, la gestion des résidus de cultures, ainsi que la rotation des cultures, le choix des cultures et des cultures de couverture. Du fait de la sensibilité des micro-organismes du sol à la fertilisation chimique et du lien très important existant entre des niveaux de fertilisation élevés et une présence élevée de bioagresseurs, la réduction de la fertilisation chimique permet un renforcement des capacités de recrutement de la plante cultivée et une moindre virulence des bioagresseurs.

La stratégie de gestion des maladies s'appuie, pour les maladies telluriques, sur la compétition dans le microbiome du sol entre les pathogènes et les autres micro-organismes qui partagent les mêmes niches écologiques, et vise à protéger la plante en empêchant les maladies de s'installer. La gestion des adventices mobilise des stratégies de limitation des adventices par la diversification des cultures, y compris la rotation, le travail du sol et les effets d'allélopathie liés aux micro-organismes du sol. La gestion des ravageurs est basée sur les régulations biologiques à l'échelle du paysage (ressources et habitats pour les auxiliaires), sur l'introduction ou la promotion de micro-organismes qui perturbent la reproduction ou la nutrition des ravageurs, et sur des composés organiques qui perturbent la perception ou les capacités de reconnaissance des ravageurs.

Les systèmes de culture, hautement spécifiques, sont conçus par chaque agriculteur. Ils mettent en œuvre des principes intégratifs, systémiques et adaptatifs qui articulent la dynamique du microbiome à l'échelle de la parcelle avec le choix des cultures et des pratiques agricoles. Ces systèmes mobilisent un équipement agricole modulaire et un suivi spécifique et continu du microbiote du sol à l'échelle de la parcelle. Les systèmes de culture mobilisent également les multiples services produits par le microbiote des plantes pour la nutrition des plantes, la mycorhization, la résistance des plantes au stress et la plasticité phénotypique des plantes.

Transition vers le scénario 2, microbiomes sains

Dans le scénario 2, le récit de la transition (figure 4.2) est basé sur trois hypothèses spécifiques concernant les politiques publiques, les systèmes de connaissance et d'innovation en agriculture et les régimes alimentaires (voir le détail des hypothèses dans la section 2 du chapitre 4) : une politique holistique européenne des systèmes alimentaires (politiques publiques) ; un AKIS étendu à l'ensemble de la chaîne alimentaire et axé sur les microbiomes (AKIS) ; des régimes sains basés sur un accroissement de la diversité alimentaire (régimes alimentaires).

Mise en œuvre entre 2025 et 2030, une politique européenne holistique, approfondissant les objectifs de la stratégie « De la ferme à la table », a déclenché et accompagné la transition des systèmes agricoles et alimentaires vers une agriculture sans pesticides et des régimes alimentaires sains. Elle a répondu à une demande de produits sains des consommateurs ainsi qu'à la charge financière croissante pour les systèmes de santé nationaux liée à l'expansion des maladies chroniques en Europe.

Contrairement aux politiques antérieures cloisonnées et à leurs effets contradictoires, cette politique holistique associe dans un cadre commun une politique agricole, une politique de la chaîne de valeur alimentaire, une politique nutritionnelle et de santé, ainsi que des politiques relatives à la biodiversité, aux sols et à l'eau. Il s'est agi ainsi de mieux aligner les efforts de transformation du système alimentaire, de réduire les incohérences entre des politiques en silo, et de répondre aux enjeux du système alimentaire afin de permettre aux consommateurs d'avoir accès à des aliments sains et de promouvoir une agriculture sans pesticides chimiques.

Pour réaliser ces objectifs, les politiques alimentaires, agricoles et de santé publique se sont réorganisées autour des paradigmes du microbiome et de l'hobionte, qui ont été les principaux outils de la transition. Pour réaliser cette transition, des actions publiques et privées ont été mises en œuvre à trois niveaux : le marché alimentaire, la chaîne alimentaire et l'exploitation agricole.

Dès 2025, des politiques européennes ont aidé les consommateurs à accéder à des aliments sains, en les subventionnant et en taxant les produits ultratransformés. Des subventions aux consommateurs, ainsi qu'un soutien aux marchés publics ciblant les aliments sains, ont été mis en œuvre depuis 2025 pour garantir l'accès de tous à des aliments sains, tels que les fruits et légumes, les légumineuses et les céréales complètes. D'autre part, des taxes ont été appliquées aux aliments ultratransformés (contenant des graisses trans, du sucre, des céréales raffinées, du sel, des additifs) afin d'en limiter la consommation. Ces taxes ont également été appliquées aux importations de produits alimentaires, afin d'empêcher l'entrée de ce type de produits alimentaires sur les marchés européens. Les accords commerciaux bilatéraux de l'UE comprennent désormais une clause de réciprocité en matière d'environnement et de santé, afin d'obtenir des partenaires commerciaux qu'ils s'engagent à fournir au marché européen des produits alimentaires sains et produits sans pesticides chimiques. Par ailleurs, les gouvernements nationaux mènent des campagnes ciblées de sensibilisation à l'alimentation et à la nutrition et favorisent les aliments sains dans la restauration publique (écoles, hôpitaux, institutions publiques). Ces actions ont abouti à une transition vers des régimes alimentaires diversifiés en Europe.

La gouvernance de la chaîne de valeur alimentaire repose sur des partenariats et des relations solides entre les acteurs de la chaîne de valeur (producteurs, coopératives, transformateurs, distributeurs). Les coopératives se sont diversifiées en matière de production, et le rôle des agriculteurs dans la prise de décision s'est renforcé.

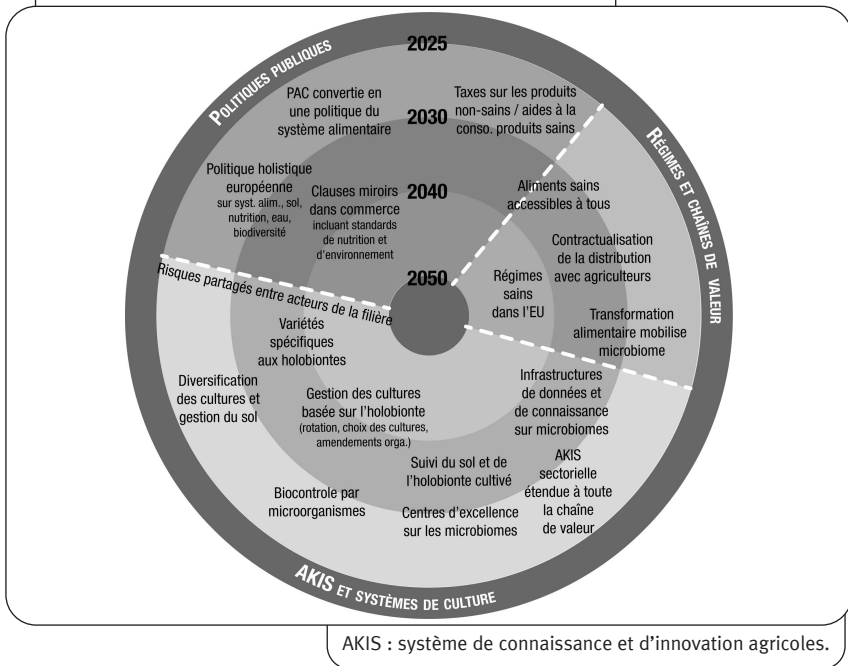
Les distributeurs ont conclu des contrats avec les agriculteurs (et les transformateurs) qui prévoient une majoration de prix en cas de respect d'une production sans pesticides chimiques, et également une réduction des déchets tout au long de la chaîne alimentaire. En début de transition, les risques résultant de la variabilité de la production des systèmes de culture sans pesticides en transition ont été partagés entre les acteurs de la chaîne de valeur. Des centres d'excellence sur la connaissance des microbiomes se sont développés à partir de 2025-2030, incluant tous les acteurs de la

chaîne de valeur. Et dès 2030, ces centres ont produit de nouveaux outils permettant de surveiller la santé de l'holobionte et les dynamiques des microbiomes. Après 2035, le suivi des microbiomes tout au long de la chaîne de valeur s'est mis en œuvre, au travers du partage de données et des technologies de *blockchain* ; il s'effectue à différents stades dans la parcelle, pendant la collecte, la transformation et la distribution.

Dans les exploitations agricoles, la transition vers des systèmes sans pesticides chimiques s'est faite en deux temps. Tout d'abord, sous l'impulsion des politiques européennes, les systèmes de culture ont mobilisé les connaissances existantes concernant la diversification des cultures, la gestion du sol, le contrôle biologique et l'utilisation de variétés de semences adaptées au contexte local (pédoclimatique, microbiome du sol). Au cours de cette première période, des réglementations européennes spécifiques pour l'approbation de nouveaux intrants biologiques ont vu le jour et les entreprises produisant des intrants chimiques ont réorienté leur production vers des solutions à base de micro-organismes.

Dans une seconde période, les agriculteurs ont commencé à utiliser les nouveaux outils disponibles de suivi des microbiomes et de l'holobionte cultivé dans leurs parcelles pour définir des stratégies de gestion des systèmes de culture. En 2040, grâce

Figure 4.2. Trajectoire de transition pour le scénario 2



au partage des données et des expériences entre agriculteurs, à l'accompagnement par le conseil public et privé, et à l'accès à des variétés améliorées favorisant les synergies entre la plante et les micro-organismes de chaque parcelle, les stratégies de gestion de l'holobionte ont été intégrées aux systèmes de culture des agriculteurs. Des agroéquipements modulaires et mutualisés ont été développés dans des laboratoires vivants ou des tiers lieux à travers des dynamiques de co-conception et d'expérimentation. L'apprentissage des agriculteurs a été accompagné par du conseil public et privé sur les nouvelles technologies telles que le suivi, les capteurs et sur la gestion des cultures, et par le biais de plates-formes d'échange de pratiques entre agriculteurs. Dès 2040, les agriculteurs ont eu accès à des variétés de semences sélectionnées favorisant les synergies entre les plantes cultivées et les communautés microbiennes, et compatibles avec les microbiomes du sol de chaque parcelle.

Récit du scénario 3 (S3) : paysages emboîtés

Le titre long du scénario 3 est « des paysages complexes et diversifiés et des chaînes alimentaires régionales pour un système alimentaire européen une seule santé ».

En 2050, les chaînes de valeur territoriales et régionales produisent des aliments qui préservent la santé humaine et l'environnement, dans une dynamique de transition vers un système alimentaire « une seule santé » impulsée par l'UE. La consommation de produits alimentaires issus d'une agriculture sans pesticides chimiques a répondu à deux préoccupations : la demande d'une alimentation locale, saine et sans pesticides chimiques, et la prise de conscience de la nécessaire préservation de la biodiversité et de la santé de l'environnement. Cette transformation résulte également d'une diversification des chaînes de valeur et des exploitations agricoles et de leur réencastrement dans les territoires et les régions. Elle s'est traduite par une reconception des systèmes de culture basée sur des paysages complexes et des cultures diversifiées.

En 2050, des chaînes de valeur diversifiées traitant un large panel de productions sont ancrées dans des territoires et de petites régions. La gouvernance des chaînes de valeur est basée sur la proximité géographique des agriculteurs et des transformateurs ainsi que sur les relations fortes entre les acteurs des chaînes de valeur (producteurs et coopératives, transformateurs, distributeurs). Des labels fondés sur des données (scientifiquement fondées, *evidence-based* en anglais) ou des applications web gérées par des tierces parties fournissent aux consommateurs des données relatives à l'impact réel des aliments sur l'environnement et la biodiversité. Les consommateurs et les acteurs du territoire (dont les collectivités locales) et des chaînes de valeur sont impliqués dans le suivi des impacts des produits alimentaires sur l'environnement et la santé humaine. Les aliments sont conservés avec un minimum de transformation et la lutte biologique est employée pour le stockage et la distribution. La logistique est adaptée à la diversification des cultures et à la saisonnalité des produits. De plus, une part de la production est échangée entre les régions pour assurer un accès constant à des aliments sains et diversifiés dans l'ensemble des régions européennes.

Les agriculteurs et les acteurs locaux ont réaménagé le paysage pour favoriser la biodiversité fonctionnelle afin d'accroître les régulations biologiques des bioagresseurs. Les paysages forment une matrice stable d'habitats naturels et semi-naturels associée à une mosaïque de cultures dont la composition et la configuration peuvent être adaptées. Les agriculteurs ont accru l'hétérogénéité du paysage agricole en réduisant la taille des parcelles, en augmentant les zones d'interface, dont les habitats semi-naturels (haies, forêts, pâturages permanents), qui occupent 20 % de l'espace tout en étant répartis régulièrement dans les paysages. Les autres acteurs du territoire participent à la mise en œuvre de ces paysages complexes favorisant la biodiversité.

Les systèmes de culture s'appuient sur une diversification des paysages et des cultures, adaptée aux conditions locales et à leurs évolutions et permettant de créer, en ce qui concerne les habitats et les ressources, des discontinuités pour les bioagresseurs et des continuités pour les auxiliaires et les autres organismes vivants. Les systèmes de culture sont diversifiés dans l'espace et dans le temps, avec des rotations longues, des cultures multiples et de couverture, des cultures associées, des mélanges de variétés ou de populations dans une même parcelle et de l'agroforesterie. La mosaïque des cultures s'adapte dans sa composition et dans sa configuration, aux enjeux locaux de la protection des cultures.

Les pratiques culturales sont adaptées pour gérer les bioagresseurs (stratégies basées sur des plantes pièges ou plantes répulsives – *push-pull* –, cultures barrières, cultures qui concurrencent les adventices, diversité dans la rotation des cultures et les résistances, dilution des ressources, renouvellement des variétés pour limiter les risques), tout en préservant les auxiliaires et autres organismes vivants. Les variétés et les populations ont été sélectionnées dans le but de diversifier les cultures (par exemple, pour favoriser les interactions entre les plantes), d'accroître leur capacité à interagir positivement à l'intérieur de la parcelle (cultures associées) et d'augmenter l'hétérogénéité parmi les variétés de cultures (diversification génétique). La gestion des maladies des plantes s'appuie sur la prophylaxie, la connaissance des cycles des bioagresseurs et des agents pathogènes, ainsi que sur la régulation biologique assurée par les micro-organismes du sol et les paysages. Pour la gestion des adventices, la stratégie consiste à trouver un compromis entre les pertes de récolte et les services assurés au niveau du paysage par les adventices. Le recours aux méthodes mécaniques ou biologiques de lutte ne se fait qu'en dernier ressort ou de manière transitoire. Le développement d'une architecture d'équipements modulaires et une mutualisation des équipements ont permis aux agriculteurs de combiner et d'adapter les agroéquipements aux spécificités de leurs systèmes de culture (par exemple, les cultures associées). Pour anticiper l'émergence de bioagresseurs et l'évolution du contexte climatique, les agriculteurs ont développé des outils collectifs (basés sur des capteurs, des outils de télédétection, du *crowdsourcing* et de la modélisation) afin de surveiller les régulations biologiques à l'échelle du paysage et éclairer au fil du temps leurs décisions.

Les transformations des systèmes agricoles, des paysages et des systèmes alimentaires se sont appuyées sur une coordination forte des pratiques des acteurs entre

agriculteurs intégrant les acteurs locaux, ainsi que sur une gouvernance collective cohérente avec les échelles de gestion des bioagresseurs. La gouvernance partagée du territoire a à la fois permis de fournir un accès local à des aliments sains et diversifiés et de construire des paysages complexes.

Transition vers le scénario 3, paysages emboîtés

Dans le scénario 3, le récit de la transition (figure 4.3) est basé sur trois hypothèses spécifiques concernant les politiques publiques, les systèmes de connaissance et d'innovation en agriculture et les régimes alimentaires (voir le détail des hypothèses dans la section 2 du chapitre 2) : des politiques intersectorielles et territoriales (politiques publiques) ; des systèmes de connaissance et d'innovation localisés et adaptés au contexte local (AKIS) ; un régime « une seule santé » combinant santé humaine et santé de l'environnement (régimes alimentaires).

L'élément déclencheur de cette transition est l'émergence de coordinations locales d'acteurs incluant des agriculteurs, des transformateurs et des acteurs publics cherchant à développer des territoires et des systèmes alimentaires sans pesticides chimiques. Cette transition répond à un souci de protection de la santé et de l'environnement des habitants des territoires ruraux et périurbains, à une demande alimentaire des consommateurs et à une prise de conscience globale de la perte de biodiversité par les citoyens. Dans le cadre d'États décentralisés, des politiques intersectorielles territoriales (agriculture, eau, sol, biodiversité et alimentation) se mettent en place après 2030 grâce à des processus participatifs incluant agriculteurs, habitants, acteurs privés et acteurs publics. Elles visent à planifier l'utilisation des terres dans les territoires et à concevoir des paysages permettant d'accroître la régulation biologique ainsi que de protéger les ressources en eau, le sol et la biodiversité. Ces organisations ont également relocalisé le système alimentaire en favorisant l'échange d'aliments produits localement et en développant des chaînes d'approvisionnement locales ainsi qu'une production agricole sans pesticides chimiques. L'accès à la terre a été conditionné à la conformité des systèmes agricoles aux objectifs de biodiversité définis par la gouvernance du territoire. En 2030, chaque territoire était en mesure de surveiller sa biodiversité et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement. Des fonds mutualisés garantissent sur chaque territoire le partage des coûts et des bénéfices de la sortie des pesticides chimiques entre les agriculteurs et les acteurs publics et privés du territoire.

Pour soutenir la transition des territoires, la PAC a subventionné les agriculteurs en favorisant la diversification des cultures et des exploitations, la complexification des paysages et la réduction de l'utilisation des pesticides pendant une période de transition (10 ans). À partir de 2040, une nouvelle politique européenne a été conçue (remplaçant la PAC) visant à rémunérer les services écosystémiques fournis par les activités des agriculteurs, et au-delà, par tous les acteurs du territoire dont l'activité est liée à l'écosystème. Dans un contexte de forte décentralisation et de subsidiarité des États en Europe, ces aides sont distribuées par les collectivités territoriales pour accompagner leur propre

transition vers un territoire « une seule santé » (environnementale et humaine). Une norme « une seule santé » est élaborée au niveau de l'UE après 2035, et mise en œuvre à l'échelle territoriale, elle comprend une série de critères liés à la production locale, à la préservation de l'eau, de l'air et du sol, au paysage et à la biodiversité.

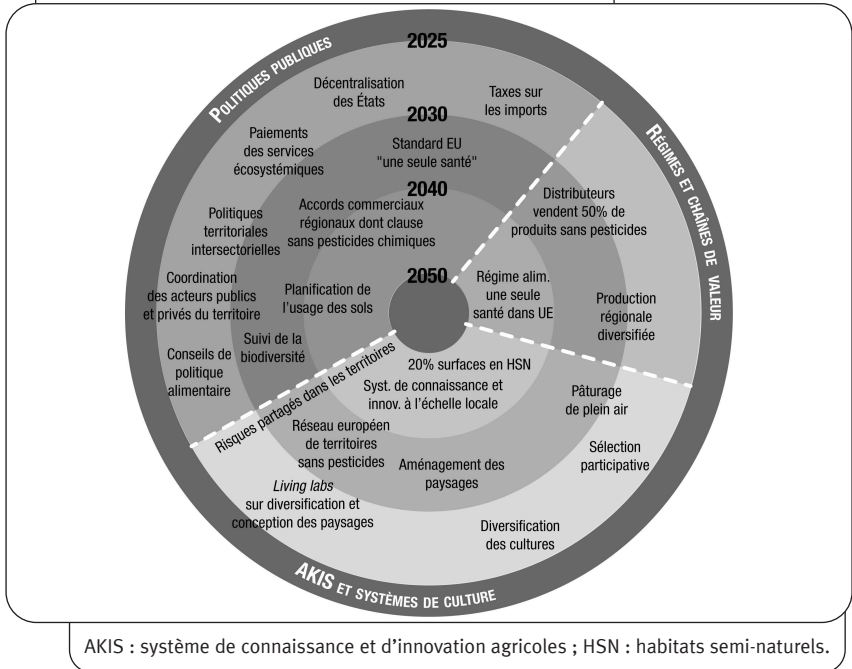
La transition a été accompagnée par la généralisation après 2025 de laboratoires vivants dans les territoires, qui ont permis d'élaborer des connaissances et de tester de nouvelles pratiques de gestion des bioagresseurs basées sur les régulations biologiques et le renforcement de la biodiversité. En dix ans, des systèmes de connaissance et d'innovation localisés se sont développés, donnant naissance à des petites universités et des centres de recherche ancrés dans les territoires et les contextes locaux, tout en étant insérés dans des réseaux européens. Des laboratoires vivants multiacteurs ont mené des recherches *in situ* dans les exploitations agricoles. Grâce à ces connaissances locales, les agriculteurs ont développé des pratiques de diversification des cultures, d'agroécologie et de gestion des paysages en s'appuyant également sur les échanges d'expérience entre agriculteurs.

Au niveau de l'exploitation agricole, la transition a mobilisé la sélection participative de variétés de cultures adaptées à la diversification (mélanges d'espèces et de variétés), un développement des habitats semi-naturels, la réintégration de l'élevage dans les exploitations spécialisées et le développement de pâturages en plein air pour l'élevage. Les agriculteurs ont mobilisé des équipements modulaires pour l'agriculture (machines et outils adaptés aux petites parcelles et aux spécificités locales des systèmes de culture), mettant en commun les équipements les plus coûteux. Pour élaborer leur système de culture, les agriculteurs ont mis en œuvre un processus d'apprentissage adaptatif basé sur l'évaluation des interactions socioécologiques. Ils ont collaboré avec les acteurs locaux pour concevoir, chaque année, une mosaïque de cultures appropriée et à plus long terme, pour reconfigurer l'organisation spatiale des parcelles et des habitats semi-naturels. En conséquence, en 2030, la production régionale s'était diversifiée. En 2040, les habitats semi-naturels (y compris les pâturages permanents) et les forêts représentaient 20 % de l'occupation du sol.

Afin de créer un environnement économique propice à la transition des marchés alimentaires, l'UE a décidé d'exiger que les produits agroalimentaires importés soient conformes aux règles sanitaires et environnementales en vigueur dans les secteurs et marchés agroalimentaires européens. L'UE a mis en place, à partir de 2027, des taxes élevées sur les importations de produits destinés à l'alimentation humaine issus de plantes cultivées avec des pesticides chimiques. Parallèlement, les règlements de l'UE ont progressivement interdit les substances actives des pesticides chimiques sur la base de leurs effets sur la santé et l'environnement (en incluant des critères supplémentaires, basés sur une évaluation scientifique des effets cocktail des pesticides et des mélanges de substances dans la formulation d'un pesticide, ainsi que des impacts des pesticides sur les populations d'organismes). Ces évaluations ont conduit à une réduction progressive des substances disponibles sur le marché, jusqu'à l'interdiction

totale des pesticides chimiques dans l'UE (sans dérogation) en 2035. Les produits alimentaires souhaitant entrer sur les marchés européens ont dû alors répondre à des standards européens : être produits sans pesticides chimiques, avoir une qualité nutritionnelle minimale, et répondre à des critères de durabilité des systèmes de production.

Figure 4.3. Trajectoire de transition pour le scénario 3



2. Les enjeux des trajectoires de transition vers un système alimentaire sans pesticides chimiques : politiques publiques, systèmes de connaissance et d'innovation agricoles et changements de régimes alimentaires

Meunier C., Mora O.

Pour parvenir à une agriculture sans pesticides chimiques d'ici 2050, il s'agit de transformer les différentes activités des systèmes alimentaires, mais aussi d'accompagner la transition vers une sortie des pesticides chimiques par des dispositifs appropriés

et un environnement favorable. C'est pourquoi, dans le cadre de la prospective, nous avons étudié quelles évolutions des politiques publiques, des régimes alimentaires ainsi que des systèmes de connaissance et d'innovation agricoles (AKIS) pourraient soutenir ces transformations. Les experts contributeurs à ces thématiques sont présentés dans les tableaux A.7 et A.10.

I Des politiques publiques et des règles du commerce international pour soutenir la transition vers l'agriculture sans pesticides chimiques

La transition vers une agriculture sans pesticides chimiques nécessite des politiques publiques fortes pour permettre de fixer des objectifs convergents et de soutenir les acteurs dans leurs changements de pratiques. Aujourd'hui, en Europe et dans les États membres, de nombreuses politiques publiques abordent la question des pesticides, au travers de thématiques très différentes (économie, agriculture, santé et environnement), à différentes échelles géographiques, et avec différents instruments (formations, informations, taxes, interdictions, etc.). Sur la base de l'analyse des tendances passées et actuelles, nous avons formulé des hypothèses sur les évolutions de ces politiques publiques et de leurs instruments qui pourraient permettre le développement de systèmes alimentaires sans pesticides chimiques en Europe en 2050, pour chacun des scénarios présentés dans la section précédente (chapitre 4, section 1).

Le cadre législatif réglementant l'utilisation des pesticides sur le marché européen et son évolution future

La procédure de mise sur le marché des pesticides dans l'UE est actuellement considérée comme l'une des plus strictes au monde (Robinson *et al.*, 2020). Elle a évolué au fil des ans, et continue de le faire, en incluant régulièrement de nouveaux critères pour l'évaluation de la sécurité et de l'environnement des substances actives. Par exemple, l'Efsa a publié en 2018 un guide relatif à l'évaluation des propriétés perturbatrices endocriniennes (Echa et Efsa, 2018) et, en 2022, un nouvel ensemble de critères pour les micro-organismes (Mombert *et al.*, 2022). Dans le futur, de nouveaux critères pourraient être intégrés aux évaluations sur, par exemple, l'évaluation des effets des pesticides sur des populations d'organismes, la toxicité des résidus multiples (effets cocktails) ou des métabolites de pesticides. Ces critères de plus en plus stricts ont conduit et devraient continuer à conduire à des interdictions de substances actives, limitant les possibilités de lutte chimique contre les bioagresseurs. En effet, Marchand (2022) a calculé qu'entre 2018 et 2022, 53 substances actives ont été « perdues » (solde entre les approbations ainsi que les non-renouvellements, les retraits et les fins d'approbations), et il s'agit en majorité de substances actives chimiques. L'Association européenne pour la protection des cultures (*European crop protection association* en anglais) a estimé en 2017 que 58 substances actives dans les années à venir pourraient faire l'objet d'une non-approbation et être retirées du marché du fait de leurs risques (Bryant Christie, 2017).

En outre, le cadre réglementaire de l'homologation des pesticides devrait évoluer pour s'adapter aux innovations dans le domaine de la protection des cultures, et mieux prendre en compte les substances non chimiques telles que les produits de biocontrôle. En effet, comme détaillé dans la partie suivante, ces produits connaissent une forte dynamique d'innovation, encouragée par les politiques publiques. Plusieurs évolutions de la réglementation permettent déjà une plus grande facilité d'accès au marché pour ces produits. En France, elles bénéficient de dérogations aux règles générales applicables aux pesticides : le certificat d'économie de produits phytosanitaires (CEPP) n'est pas requis pour les agriculteurs qui utilisent uniquement des produits de biocontrôle ; de plus, certaines zones tampons, où l'utilisation de pesticides est interdite, peuvent toujours être traitées avec des produits de biocontrôle (Grimonprez, 2022).

Plusieurs auteurs et parties prenantes appellent à plus de transparence dans les évaluations des risques des pesticides et de leurs substances actives (Robinson *et al.*, 2020 ; Möhring *et al.*, 2020 ; Ecorys, 2018 ; Storck *et al.*, 2017). Par exemple, Möhring *et al.* suggèrent que des laboratoires indépendants et anonymes pourraient mener des études en complément des données fournies par l'industrie, afin d'accroître la crédibilité et la fiabilité de l'expertise, tout en réduisant les conflits d'intérêts (Möhring *et al.*, 2020). Topping *et al.* (2020) préconisent un système de « pesticidovigilance » après la mise sur le marché des substances actives des pesticides, dans lequel plusieurs parties prenantes seraient impliquées, y compris les agriculteurs, et fourniraient des informations sur leur utilisation des pesticides, ainsi que des données agronomiques et environnementales. À leur tour, les agriculteurs recevraient de la part des évaluateurs de risques des informations sur les pesticides qu'ils utilisent.

Des politiques de réduction de l'utilisation des pesticides cloisonnées et peu articulées avec d'autres politiques

Depuis les années 2000, on assiste à une multiplication des politiques de gestion et de réduction de l'utilisation et des risques liés aux pesticides dans l'UE, qui sont conçues indépendamment les unes des autres. L'une des premières politiques a été introduite en 2000 et concerne la qualité de l'eau, avec pour objectif d'atteindre un bon état chimique et écologique des eaux dans chaque bassin hydrographique, notamment en ce qui concerne la pollution liée aux pesticides chimiques (EC, 2000). La spécificité de cette directive est qu'elle introduit une gestion de la qualité des eaux dans chaque bassin hydrographique, correspondant à une unité géographique et hydrologique naturelle. De plus, ces plans de gestion impliquent les acteurs locaux dans un processus collectif et participatif (impliquant représentants élus, représentants de l'administration, utilisateurs de l'eau, y compris les industries, agriculteurs, citoyens et associations). Les objectifs, le plan de gestion et l'ensemble des mesures prises sont révisés et mis à jour tous les six ans depuis 2009. L'objectif initial de la directive, qui était d'atteindre au moins un bon état écologique pour toutes les masses d'eau de surface d'ici 2015, n'a pas été atteint et est actuellement prolongé jusqu'en 2027. Selon l'Agence européenne

pour l'environnement, en 2018, environ 40 % des eaux de surface en Europe étaient en bon état écologique, et 38 % seulement en bon état chimique. Les pressions hydromorphologiques (40 %) et la pollution diffuse d'origine agricole (38 %) sont les deux principales causes de la mauvaise qualité des eaux de surface (Bierozza *et al.*, 2021).

La directive sur l'utilisation durable des pesticides (Directive 2009/128/EC ou directive SUD) est souvent citée dans la littérature comme un élément central de la législation relative à la réduction de l'utilisation des pesticides. Elle définit le cadre permettant de réduire les risques et l'utilisation des pesticides, en encourageant la mise en place de la protection intégrée des cultures (IPM pour *integrated pest management* en anglais) et d'autres approches ou techniques telles que les alternatives non chimiques aux pesticides chimiques. Avec la directive SUD, l'application des principes de l'IPM est devenue obligatoire, chaque État membre devant élaborer un plan d'action national avec des objectifs, des cibles et des indicateurs mesurables. Selon un rapport de la Cour des comptes européenne (ECA pour *European court of auditors* en anglais) en 2020 (ECA, 2020), la majorité des États membres ont mis en place des systèmes de formation et de certification, interdit la pulvérisation aérienne et pris des mesures pour protéger l'environnement aquatique et veiller à ce que les pesticides soient stockés et manipulés en toute sécurité. Certains États membres ont introduit des instruments économiques – taxes et incitations – pour soutenir l'adoption de pratiques utilisant moins de pesticides. Cependant, les déclinaisons des principes de l'IPM ont été floues et ont eu un effet limité sur les usages des pesticides dans les systèmes de culture (Deguine *et al.*, 2021). Un autre type d'instrument politique utilisé par certains États membres est la restriction de l'utilisation des pesticides dans certaines zones afin de protéger les zones et les populations sensibles.

Les politiques de nutrition et de santé abordent également la question de la réduction de l'utilisation des pesticides et des risques pour la santé humaine, en fixant des limites maximales de résidus de pesticides pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, à l'aide d'une réglementation européenne. Chaque année, l'Efsa établit un rapport sur la qualité des aliments en ce qui concerne les résidus de pesticides, sur la base des données fournies par les États membres (Efsa, 2022). En 2020, les résultats montrent que 94,9 % des échantillons sont dans les limites autorisées par la loi. Les limites ont été dépassées dans 5,1 % des échantillons, soit une légère augmentation par rapport à 2019 (3,9 %) et 2018 (4,5 %).

Un autre exemple de politique de santé publique mis en place concerne le soutien à la consommation de produits bio dans les marchés publics. En France, depuis 2022, les établissements de restauration collective (écoles, universités, cantines des administrations publiques) doivent fournir un « minimum de 50 % de produits alimentaires de qualité et durables, dont 20 % d'aliments bio » (Loi n° 2018-938 du 30 octobre 2018 ou loi Egalim). De même, en Italie, à Rome, le programme d'alimentation scolaire « Tutto per la Qualità » (Tout pour la qualité) se concentre sur l'achat d'aliments locaux et bio pour les écoles.

Les évaluations réalisées sur ces multiples politiques publiques mises en place depuis les années 2000 suggèrent qu'elles n'ont eu que des effets limités sur la réduction des utilisations et des risques de pesticides en Europe (voir par exemple Möhring *et al.*, 2020 ; ECA, 2020 ; Jacquet *et al.*, 2022). Cela se traduit dans les indicateurs de suivi (indicateurs de risque harmonisés, HRI pour *harmonized risk indicators* en anglais) mis en place par la Commission européenne qui montrent une réduction de 21 % de l'usage et des risques de pesticides entre 2011-2013 et 2019, et une augmentation importante du nombre d'autorisations d'urgence de pesticides pendant la même période, de 55 % (EC, 2021b). Une des raisons évoquées par certains auteurs est que ces politiques ont été créées indépendamment d'autres politiques impactant les agriculteurs et leurs pratiques, les plaçant devant plusieurs objectifs différents, à prioriser. Pour améliorer cette situation, les auteurs et certaines organisations recommandent la mise en place d'une politique holistique sur les systèmes alimentaires, permettant une cohérence entre différents objectifs, l'implication de tous les acteurs de la chaîne et évitant les effets pervers (Poux et Aubert, 2018 ; Möhring *et al.*, 2020 ; IPES-Food, 2019 ; Parsons, 2019). Cette approche holistique est portée par le Pacte vert adopté en 2019 par l'UE, pour atteindre la neutralité carbone de l'Europe en 2050 (EC, 2019a). Le Pacte vert fixe 10 stratégies de durabilité qui concernent l'ensemble de l'économie européenne, dont les systèmes alimentaires. Parmi ces stratégies, on trouve l'objectif de réduire de 50 % les usages et les risques liés aux pesticides d'ici à 2030.

Simultanément, des initiatives territoriales se sont progressivement mises en place, en lien avec les préoccupations sociétales croissantes quant aux impacts des pesticides. Depuis le début des années 2000, les actions menées au niveau local par les habitants ont réussi à influencer la mise en place de politiques municipales, territoriales ou régionales concernant l'utilisation des pesticides, qui vont au-delà du cadre réglementaire national. Par exemple, dans la province de Belluno, dans le nord-est de l'Italie, une mobilisation anti-pesticides a débuté en 2008 à la suite de l'implantation de vergers et de vignobles cultivés de façon intensive dans la région. Ce développement a suscité l'inquiétude des habitants quant aux conséquences négatives sur la santé et l'environnement de l'utilisation des pesticides et de la pollution des eaux souterraines. Un mouvement de protestation – Terra Bellunese – a été créé en 2014, et a proposé une révision de la loi pour interdire les pesticides dangereux dans les municipalités de la province. Cette proposition de révision de la loi a été accompagnée d'une campagne publique pour informer les habitants sur les impacts des pesticides, et d'une pétition pour donner plus de poids et légitimer l'action. Quatorze municipalités ont adopté la proposition de loi entre 2016 et 2018, couvrant ainsi la moitié de la population (Zollet et Maharjan, 2021).

Sur la base de l'expérience apportée par plusieurs initiatives similaires menées dans diverses régions ou territoires, il semble que la coordination territoriale des acteurs permette le développement de solutions innovantes pour la réduction de l'utilisation des pesticides et facilite l'action collective (Bazoche *et al.*, 2022). En effet, l'élaboration

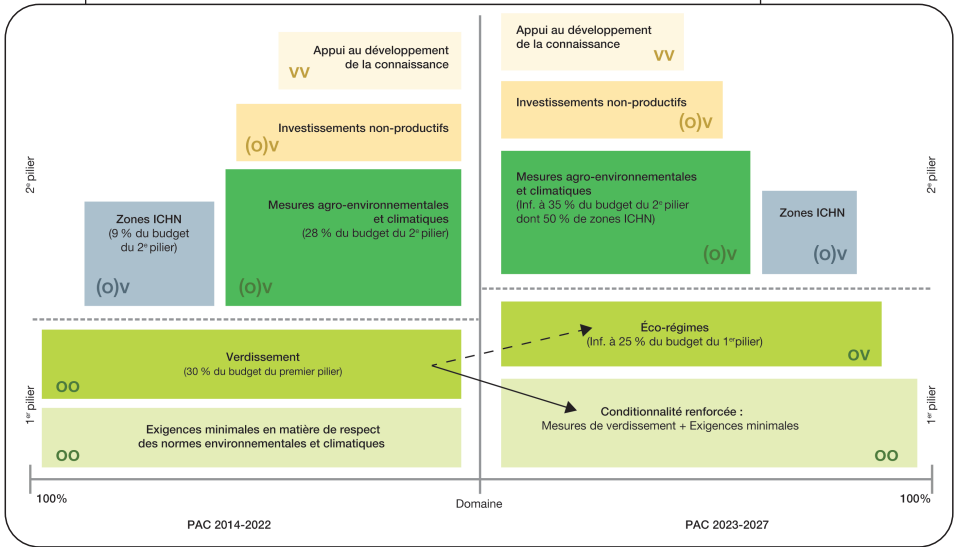
de plans de gestion au niveau local s'avère mieux ciblée sur les spécificités et les problèmes locaux (Galli *et al.*, 2020). Plusieurs auteurs considèrent que ces initiatives sont très prometteuses pour réduire les impacts environnementaux, mais aussi pour redonner de la valeur aux petits agriculteurs et aux entreprises alimentaires locales, et ainsi rétablir les liens entre les acteurs du système alimentaire et, en fin de compte, la confiance des consommateurs dans les systèmes alimentaires (IPES-Food, 2019).

Le rôle de la PAC et des instruments économiques pour soutenir la transition vers une agriculture sans pesticides chimiques

Depuis les années 1990, la PAC a été progressivement verdie afin d'encourager les changements de pratiques par l'introduction de mesures d'accompagnement ou d'incitation pour les agriculteurs. Ainsi, dans sa dernière réforme, la PAC 2023-2027 propose une nouvelle « architecture verte » autour de trois instruments environnementaux : la conditionnalité renforcée ; les mesures agri-environnementales et climatiques (MAEC) dans le second pilier ; et les nouveaux écorégimes dans le premier pilier (figure 4.4). La nouvelle PAC renforce également le budget alloué à cette « architecture verte » : les États membres sont tenus d'investir au moins 20 % des paiements du premier pilier dans des éco-régimes en 2023-2024 et au moins 25 % après 2025. De même, la part minimale des paiements du second pilier pour les instruments environnementaux passe de 30 % jusqu'en 2023 à 35 % après 2023 (Pe'er *et al.*, 2022).

Malgré l'intégration croissante des aspects environnementaux dans les différentes réformes de la PAC et de leurs instruments, et les résultats positifs obtenus avec certaines MAEC (Kuhfuss et Subervie, 2018 ; Jaime *et al.*, 2016), plusieurs auteurs ont remis en cause leurs impacts environnementaux, notamment leurs effets sur la réduction de l'utilisation des pesticides. Ils appellent à une refonte de la PAC et à la mise en œuvre d'autres politiques (Wezel *et al.*, 2018 ; Guyomard *et al.*, 2020 ; Heyl *et al.*, 2020 ; Bazoche *et al.*, 2022 ; Pe'er *et al.*, 2022). Par exemple, les mesures agro-environnementales actuelles compensent les coûts liés à l'adoption d'une nouvelle pratique visant à améliorer les conditions environnementales. À l'avenir, elles pourraient évoluer vers des paiements pour les services environnementaux (PSE) fournis par les agriculteurs. Les PSE sont des outils qui rémunèrent les agriculteurs (et d'autres acteurs) pour des actions contribuant à la restauration ou au maintien des écosystèmes, impliquant des bénéfices pour la société (Duval *et al.*, 2019). Des études montrent que les systèmes axés sur les résultats, tels que les paiements pour un service environnemental fourni, obtiennent de meilleurs résultats que les systèmes axés sur les moyens (par exemple, le paiement pour l'adoption d'une pratique). Plusieurs auteurs soutiennent cette évolution vers les PSE (Buckwell *et al.*, 2020), et plus particulièrement la prise en compte des biens publics produits par l'agriculture sans pesticides, par exemple l'augmentation de la biodiversité (Jacquet *et al.*, 2022).

Figure 4.4. Évolution des mesures environnementales de la PAC entre 2014-2022 et 2023-2027



La largeur des cases (axe des abscisses) reflète l'étendue relative de la zone affectée par les mesures. L'intensité de la couleur verte reflète l'efficacité potentielle pour la biodiversité. Zones ICHN : zones de handicaps naturels ; OO : mise en œuvre obligatoire pour les États membres et pour les agriculteurs ; OV : mise en œuvre obligatoire pour les États membres, volontaire pour les agriculteurs ; (O)V : mise en œuvre minimale obligatoire pour les États membres, volontaire pour les agriculteurs ; VV : mise en œuvre volontaire pour les États membres et pour les agriculteurs. Source : Pe'er *et al.*, 2022.

On trouve dans la littérature un certain nombre de travaux dans lesquels les auteurs proposent de compléter cette refonte de la PAC par diverses combinaisons d'instruments économiques, afin de maximiser l'impact de l'ensemble de la politique. Voici quelques exemples de combinaisons d'instruments jugées efficaces (Grimonprez et Bouchemba, 2020 ; Möhring *et al.*, 2020 ; OMS, 2015) :

- des conventions (accords entre parties) couplées à des subventions pour la transition ;
- une certification des agriculteurs en fonction du respect de certaines pratiques, couplée à des subventions pour la transition ;
- des subventions pour la transition avec à long terme une réglementation interdisant les substances ;
- des conseils sur les alternatives combinés à des systèmes d'assurance (privés, fonds de mutualisation) pour supprimer le risque lié au passage aux alternatives ;

- une taxe sur les pesticides couplée à des subventions pour les alternatives à des pesticides ;
- des subventions pour les consommateurs pour rendre les produits sains accessibles, couplées à une certification (produits sans pesticides chimiques).

Parmi les instruments économiques, les taxes sur les pesticides peuvent constituer un outil intéressant afin de soutenir la réduction de l'utilisation des pesticides. En effet, la taxation des pesticides est un instrument économique qui réduit la rentabilité de l'utilisation des pesticides, et qui, si elle est bien conçue, devrait encourager l'adoption de pratiques alternatives limitant l'utilisation des pesticides (Bazoche *et al.*, 2022). Plusieurs pays d'Europe ont mis en place des taxes sur les pesticides, dont la conception, le champ d'application et le taux varient considérablement. La taxe mise en place au Danemark est considérée comme la taxe sur les pesticides la plus élevée mise en œuvre (Pedersen *et al.*, 2020). Elle a été créée en 1972, puis révisée à plusieurs reprises. Elle aurait permis, de 2011 à 2017, une réduction de la charge en pesticides de 12 à 27 %, en fonction de l'année de référence (*ibid.*). Dans l'ensemble, les évaluations des différents systèmes de taxation des pesticides montrent que les taxes avec des taux différenciés en fonction du risque environnemental des pesticides peuvent être plus efficaces économiquement qu'une taxe forfaitaire appliquée à tous les pesticides (Sud, 2020). L'élasticité de la demande de pesticides semble être assez faible, du moins à court terme, ce qui signifie que l'utilisation des pesticides est très peu affectée par l'augmentation des prix (Skevas *et al.*, 2013 ; Bazoche *et al.*, 2022), et que des taxes élevées semblent nécessaires pour avoir un effet sur la réduction de l'utilisation des pesticides (Sud, 2020 ; Böcker et Finger, 2016). Selon certains modèles économiques, une réduction de 20 % de l'utilisation des pesticides tout en conservant le même processus de production (céréales ou cultures oléagineuses) nécessiterait par exemple une augmentation des prix d'au moins 700 %, si la taxe n'est pas différenciée en fonction du risque lié aux pesticides. Cela suggère que les taxes sur les pesticides ne peuvent suffire à elles seules à atteindre des objectifs de réduction, voire de sortie des pesticides (Ayoub et Vigeant, 2020).

La politique commerciale de l'Europe sur les produits agricoles importés

Il n'existe pas de réglementation internationale harmonisée sur les pesticides, mais un ensemble de normes, d'accords et de guides ont été élaborés depuis les années 1990. Ils couvrent l'interdiction de certaines substances nocives pour la santé humaine et l'environnement. Par exemple, la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone, qui a débuté en 1988, a réussi à réduire l'utilisation de pesticides dangereux en remplaçant le bromure de méthyle par des alternatives moins dangereuses (Parlement européen, 2021). Le *Codex alimentarius*, élaboré conjointement par l'OMS et la FAO, garantit la protection des consommateurs dans le monde entier en fixant des limites maximales de résidus de pesticides dans les aliments. Enfin, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a élaboré diverses

normes reconnues au niveau international, notamment des protocoles d'essai normalisés pour les études toxicologiques.

En ce qui concerne l'Organisation mondiale du commerce (OMC), les pesticides sont couverts par l'accord sur les mesures sanitaires et phytosanitaires, qui permet aux États de fixer leurs propres normes, à condition qu'elles soient appliquées pour protéger la santé et la vie des personnes et des animaux ou préserver les végétaux, et qu'elles n'entraînent pas de discrimination entre les États où règnent des conditions identiques ou similaires.

Plusieurs collaborations ont été mises en place entre les États en ce qui concerne la réglementation des pesticides. Par ailleurs, des normes privées internationales fixent des règles spécifiques concernant l'utilisation des pesticides dans la production agricole. L'une des plus importantes est GLOBALG.A.P., créée en 1997 par plusieurs distributeurs nord-européens (Raymond et Bonnaud, 2014). Elle couvre aujourd'hui plus de 700 produits certifiés et plus de 200 000 producteurs certifiés, dans plus de 135 pays. Ces standards privés et volontaires peuvent compléter les lois existantes en fixant des exigences ou des critères supplémentaires sur certains sujets.

L'Europe applique actuellement ses propres limites maximales de résidus de pesticides aux produits importés destinés à l'alimentation humaine et animale. En revanche, elle n'impose pas ses exigences en matière d'utilisation de pesticides dans les cultures, ce qui signifie qu'un aliment importé peut avoir été produit en utilisant un pesticide interdit en Europe, à condition que les résidus en pesticides soient conformes aux limites fixées. Cette question de l'application de normes de production similaires pour les produits fabriqués en dehors et à l'intérieur de l'Europe est fréquemment mise à l'ordre du jour des décideurs politiques (clauses dites de réciprocité, ou clauses miroir). En ce qui concerne les pesticides, la question est de savoir si l'Europe pourrait étendre la réglementation actuelle pour les produits importés en interdisant l'utilisation de pesticides non approuvés dans l'UE pour la production de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux entrant sur le marché européen. Cette interdiction serait justifiée par la protection de la santé et de l'environnement. Interrogée par le Parlement européen et le Conseil, la Commission européenne a conclu qu'il était possible, dans le respect des règles de l'OMC, d'imposer aux produits agroalimentaires importés des exigences sanitaires et environnementales liées à leurs processus et à leurs méthodes de production. La commission appelle à une analyse au cas par cas de chaque mesure potentielle (EC, 2022d).

Les hypothèses d'évolution des politiques publiques et de leurs instruments pour soutenir la transition

Sur la base des différentes tendances observées, des hypothèses de politiques publiques ont été formulées, adaptées à chacun des scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques (tableau 4.4). Ces politiques concernent les politiques publiques de transition vers des systèmes sans pesticides, la transformation de la PAC, et la politique commerciale de l'UE.

Tableau 4.4. Hypothèses d'évolution des politiques publiques pour soutenir la transition vers chacun des scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques

	Politique publique de la transition vers le sans pesticides chimiques	Transformation de la PAC	Politique commerciale de l'UE
S1	Objectifs itératifs de réduction inscrits dans la loi	Conditionnalité des paiements renforcée	Harmonisation globale des règles internationales
S2	Politique holistique sur les systèmes alimentaires, intégrant des mesures sur les pesticides, mais aussi des mesures nutritionnelles et de santé	Intégrée à la politique sur les systèmes alimentaires, en cohérence avec les objectifs nutritionnels et de santé	Accords commerciaux incluant des clauses miroirs sur les utilisations de pesticides, et des critères nutritionnels
S3	Politique territoriale, intersectorielle et construite avec les acteurs du territoire	Paielements pour services environnementaux aux acteurs du territoire, y compris les agriculteurs	Clauses miroirs sur les pesticides et sur d'autres critères pour une approche « une seule santé »

Les différents scénarios sont présentés dans les lignes.

Dans le scénario 1, dans la continuité des objectifs des stratégies « De la ferme à la table » et « Biodiversité », des objectifs de réduction progressive des utilisations et risques de pesticides chimiques sont inscrits dans la loi, aboutissant progressivement à l'arrêt de leur utilisation. La PAC évolue pour renforcer la conditionnalité des paiements au respect des objectifs de réduction puis d'arrêt d'utilisation des pesticides chimiques. L'UE porte cet objectif d'élimination des pesticides chimiques dans les sphères internationales pour obtenir une harmonisation des règles à l'OMC et dans le *Codex alimentarius*.

Dans le scénario 2, la question des pesticides est intégrée à une politique plus générale sur les systèmes alimentaires, dans laquelle sont articulées les mesures concernant l'alimentation et la production agricole dans le but d'atteindre les objectifs nutritionnels (absence d'utilisation de pesticides chimiques, qualité des sols, de l'eau, etc.). L'objectif global de cette politique holistique est de veiller à ce que les consommateurs européens aient accès à une alimentation suffisante, sûre, saine et durable. La PAC est également intégrée à cette politique holistique sur les systèmes alimentaires. L'UE applique les objectifs de sa politique sur les systèmes alimentaires à ses partenaires commerciaux, avec des clauses de réciprocité relatives à la santé.

Enfin, dans le scénario 3, des politiques intersectorielles sont mises en place sur le territoire de façon participative, pour gérer et organiser la sortie des pesticides, l'aménagement du territoire, la conception des paysages, la protection de l'eau et des sols, la production agricole, l'approvisionnement alimentaire local, la chaîne de valeur locale et les activités commerciales. Afin de soutenir les acteurs dans la transition vers ce scénario, les services environnementaux sont rémunérés, qu'ils soient fournis par les activités des agriculteurs, et au-delà, par tous les acteurs du territoire dont l'activité est liée à l'écosystème. Les échanges commerciaux avec l'Europe sont conditionnés au respect

des normes européennes en matière d'environnement, de santé, de processus et de méthodes de production, y compris la non-utilisation des pesticides.

■ Les systèmes de connaissance et d'innovation agricoles (AKIS)

Le développement d'une agriculture sans pesticides chimiques nécessite des changements de pratiques importants au niveau des exploitations agricoles et des systèmes alimentaires. L'éducation et les systèmes de connaissance et d'innovation agricoles (en anglais AKIS pour « Agricultural Knowledge and Innovation Systems ») peuvent jouer un rôle central dans le soutien à l'innovation et à l'apprentissage au niveau des exploitations agricoles et des systèmes alimentaires. Les AKIS sont une notion qui « décrit un système d'innovation, en mettant l'accent sur les organisations impliquées, les liens et les interactions entre elles, l'infrastructure institutionnelle avec ses incitations et ses mécanismes budgétaires » (EU SCAR, 2012). Deux projets européens récents sur l'AKIS, PRO AKIS et izconnect (Knierim *et al.*, 2017 ; Labarthe, 2016 ; Prager *et al.*, 2015 ; Birke *et al.*, 2022), ainsi que la synthèse et le rapport du SCAR sur l'avenir de l'AKIS en Europe (EU SCAR, 2019) permettent de construire un panorama des tendances actuelles en matière d'AKIS.

Bref rappel historique et tendances actuelles sur l'AKIS

Le système de connaissance et d'innovation agricoles est un concept relativement nouveau apparu au cours de la dernière décennie en Europe. Il fait référence à la coopération des acteurs du transfert, de la recherche, des organisations professionnelles et inclut également d'autres parties prenantes telles que les fournisseurs d'intrants, les transformateurs de denrées alimentaires, les distributeurs, les consommateurs et divers services de soutien comme les banques ou les médias (Knierim *et al.*, 2015).

Historiquement, les services d'enseignement et de transfert en agriculture ont joué un rôle majeur dans la modernisation de l'agriculture. Ils ont soutenu, après la Seconde Guerre mondiale, une dynamique de changement technologique vers des systèmes de culture faisant notamment appel aux pesticides chimiques. Depuis les années 1980, ils ont évolué dans trois directions principales (Labarthe, 2016 ; Faure *et al.*, 2012) avec : une place grandissante des technologies numériques à la fois dans l'interaction entre agriculteurs et conseillers (décrit comme le *front-office*) et dans la contribution des systèmes de conseil à des activités et des réseaux de recherche et de développement (décrit comme le *back-office*) ; l'apparition de nouveaux modèles économiques de services de conseil, avec le retrait partiel de l'État du financement de ces systèmes et le développement de services privés ; et de nouvelles directions portées par l'AKIS pour l'agriculture en réponse à de nouvelles demandes des agriculteurs, des acteurs privés, des politiques publiques et des citoyens face aux préoccupations globales (par exemple, en développant l'agroécologie).

Une pluralité de l'AKIS en Europe

On observe actuellement une grande diversité d'AKIS et de prestataires de services de conseil agricole en Europe, en fonction de la situation institutionnelle, des acteurs et des besoins (Prager *et al.*, 2015 ; Knierim *et al.*, 2017). Au cours des dernières décennies, l'évolution des AKIS en Europe s'est caractérisée par une commercialisation croissante des services et une privatisation des acteurs publics. Alors qu'historiquement les acteurs publics fournissent les connaissances, le conseil et les financements, l'action de l'État est désormais davantage orientée vers le soutien des partenariats pour les services de conseil et l'innovation, que vers le financement direct des systèmes nationaux de services de conseil agricole (Prager *et al.*, 2015). Cette dynamique a conduit à une fragmentation des services de conseil agricole en Europe, visible en Grèce, au Portugal, en Italie et en Espagne, par exemple. Il existe également une forte concurrence entre les diverses organisations de conseil, où de nouveaux acteurs – tels que les ONG et les industries – émergent (*ibid.*).

Knierim *et al.* (2017) définissent cinq types d'organisations fournissant des services de conseil agricole dans l'UE, à savoir les institutions publiques, la recherche et l'enseignement publics, les organisations de conseil privées, les organisations d'agriculteurs ainsi que les organisations non gouvernementales. Une étude européenne récente (Birke *et al.*, 2022) montre que, dans la moitié des pays de l'UE, les services publics et les organisations d'agriculteurs sont les principaux fournisseurs de services de conseil agricole (tableau 4.5). On trouve des combinaisons des différentes formes dominantes d'organisations de conseil dans un tiers des États européens, y compris des États fédéraux ou décentralisés comme la Belgique, l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne. Les organisations d'agriculteurs, telles que les chambres d'agriculture, jouent un rôle majeur dans un tiers des pays et sont présentes dans treize États européens, mais elles ne constituent pas nécessairement la forme dominante de services de conseil (*ibid.*).

Tableau 4.5. Principaux acteurs en relation avec les agriculteurs

Principaux acteurs en relation avec les agriculteurs	Pays ou régions
Organismes publics	Bulgarie, Chypre, Hongrie, Irlande, Lituanie, Croatie, Serbie, Monténégro, Suisse
Organisations d'agriculteurs	Autriche, Danemark, Finlande, France, Portugal, Suède, Pologne, Slovaquie, Belgique-Flandres
Organisations privées de conseil	Pays-Bas, Grèce
Organismes publics et organisations d'agriculteurs	Luxembourg, Malte
Organisations publiques et privées de conseil	Belgique-Wallonie, République tchèque, Estonie
Organismes publics, organisations d'agriculteurs et organisations privées de conseil	Allemagne, Italie, Espagne, Slovaquie

Source : d'après Birke *et al.*, 2022.

La place croissante du numérique dans l'AKIS

Pour Klerkx *et al.* (2019), le numérique est un moteur majeur de l'évolution de l'AKIS, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le numérique va impacter les processus d'innovation, par exemple en intégrant l'analyse des mégadonnées (*big data* en anglais). L'agriculture numérique va également diversifier les acteurs de l'AKIS, en faisant apparaître de nouveaux acteurs tels que les entreprises des nouvelles technologies, les fabricants de drones ou de satellites, les industries de services et les fabricants d'équipements agricoles produisant des tracteurs autopilotés. Toutefois, la place critique occupée par les données dans l'agriculture numérique pose une question éthique générale concernant ces données, leur propriété, leurs conditions d'accès et le respect de la vie privée (*ibid.*).

Dans une revue scientifique récente, Fielke *et al.* (2020) identifient cinq grandes tendances liées au numérique : (i) la diversification des pratiques de recherche d'informations et des processus de production de connaissances par les acteurs de l'agriculture ; (ii) la spécialisation croissante de l'expertise décisionnelle au sein de réseaux de conseil complexes (liée notamment à la part croissante de la complexité, de l'intensité technique et de la place des données) ; (iii) la privatisation du conseil ; (iv) la marchandisation des données agricoles ; et (v) l'émergence de nouvelles lacunes en matière d'offre et de services dans le système (par exemple, l'incapacité des services de conseil agricole à soutenir économiquement le secteur agricole).

L'AKIS et la formation pour accompagner les changements transformateurs en agriculture

Il est aujourd'hui urgent de relever des défis complexes mêlant changements climatiques et écosystémiques, impératifs économiques, évolution des systèmes alimentaires et attentes sociétales, en menant des transitions vers la durabilité dans l'agriculture. Pour ce faire, l'AKIS doit passer d'une approche centrée sur les infrastructures à une approche centrée sur les processus d'innovation conçus pour soutenir la transition de l'agriculture vers une meilleure intégration des questions de durabilité (Labarthe, 2016). L'objectif d'une telle approche pour l'AKIS est de redéfinir la nature des solutions que les conseillers proposent aux agriculteurs.

La pluralité croissante des acteurs de l'AKIS pourrait être considérée comme une tendance favorable à l'accompagnement des transitions, car elle pourrait donner naissance à un paysage où une diversité de conseillers proposeraient une diversité de services et faciliteraient l'accès des agriculteurs à des connaissances pertinentes. Mais comme le note également Labarthe, dans le cadre de ce pluralisme, de grandes entreprises pourraient, à l'inverse, imposer les mêmes bases de connaissances à une diversité de fournisseurs de conseils (*ibid.*).

Bazoche *et al.* (2022) identifient certains éléments spécifiques de l'AKIS qui pourraient soutenir une transition vers une agriculture sans pesticides chimiques. L'apprentissage situationnel, basé sur l'analyse des problèmes rencontrés par les agriculteurs et des innovations nécessaires, est souvent considéré comme un aspect important de la

formation. Cet apprentissage de groupe est susceptible de développer un accompagnement mutuel entre pairs, d'encourager l'adoption de nouvelles pratiques et de stimuler les échanges sur les solutions possibles et les difficultés potentielles de leur mise en œuvre. Le conseil spécifique, au moyen de l'apprentissage expérientiel, peut faciliter le dialogue entre les agriculteurs, aider à apporter des connaissances précises et à développer des solutions appropriées.

Dans l'AKIS, les laboratoires vivants sont considérés comme des organisations spécifiques qui permettent de traiter la complexité des problèmes qui se posent et d'engager un processus de transition dans l'agriculture. En effet, répondre à des défis complexes nécessite une action impliquant de nombreux acteurs différents tels que les agriculteurs, les fournisseurs d'intrants, les développeurs de technologies, les chercheurs, les conseillers agricoles, les décideurs politiques, les citoyens et les consommateurs (Potters *et al.*, 2022). Les laboratoires vivants se caractérisent par des processus d'innovation ouverte réunissant des utilisateurs et des parties prenantes des secteurs public et privé, intégrant des processus de recherche et d'innovation pour co-créeer, valider et tester de nouveaux services, des idées commerciales, des marchés et des technologies dans des contextes réels. La participation, la co-création et la co-conception, l'approche centrée sur l'utilisateur final, l'innovation ouverte, l'expérimentation dans la vie réelle sont les principales caractéristiques des laboratoires vivants. Ils permettent de répondre à la distance croissante, souvent constatée, entre la recherche et les services de conseil.

Au cours de la dernière décennie, des laboratoires vivants d'agroécosystèmes ont été créés en Europe « afin de stimuler l'adoption plus rapide d'innovations visant à assurer la durabilité et la résilience des systèmes agricoles et agroalimentaires » (McPhee *et al.*, 2021). Pour les auteurs, les laboratoires vivants agroécosystémiques « ont le potentiel d'accélérer la co-création et l'adoption tout au long de la chaîne de valeur, en raison de leur approche centrée sur l'utilisateur » (*ibid.*). En essayant de spécifier les laboratoires vivants d'agroécosystèmes, les auteurs identifient trois caractéristiques : la durabilité, la complexité et le contexte local (*ibid.*). D'une manière plus générale, Potters *et al.* (2022) insistent sur la capacité des laboratoires vivants à renforcer les AKIS par la contextualisation et la démocratisation : « avec de nouvelles relations, une confiance accrue, la combinaison de connaissances explicites, implicites et tacites et une nouvelle compréhension émergente, les laboratoires vivants peuvent être un véhicule pour la contextualisation, la démocratisation et le renforcement des AKIS ».

L'enseignement agricole doit également évoluer pour soutenir cette transition vers la durabilité de l'agriculture. Bazoche *et al.* (2022) soulignent plusieurs éléments de cette évolution. Premièrement, il est nécessaire de développer des activités interdisciplinaires qui améliorent les connaissances et les capacités des agriculteurs et des conseillers à mettre en œuvre une agriculture sans pesticides chimiques. Deuxièmement, alors que les pratiques de l'agriculture sans pesticides sont souvent issues des pratiques d'agriculteurs pionniers et varient d'une région à l'autre, l'enseignement dispensé actuellement est uniquement basé sur des faits scientifiques établis et des

méthodes testées. Il serait bon d'imaginer de nouvelles façons d'enseigner ces éléments en cours de construction, en s'appuyant davantage sur les agriculteurs innovants et en adaptant les éléments à la diversité des lieux. Enfin, les formations agricoles devraient mieux permettre aux agriculteurs d'acquérir des compétences pour gérer l'incertitude, évaluer les risques et entreprendre des transitions, qui sont des compétences essentielles pour les agriculteurs (*ibid.*).

Hypothèses d'évolution de l'AKIS pour une agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Sur la base des tendances observées, trois hypothèses d'évolution de l'AKIS qui permettraient d'atteindre les différents scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en 2050 ont été formulées.

Dans le cadre du scénario 1, un AKIS reposant sur la gestion des données et la robotisation

L'AKIS est centré sur l'analyse de données (plus que sur l'utilisateur) et mobilise l'intelligence artificielle, la robotisation et la gestion des données. La recherche privée et les grands acteurs dominent principalement l'AKIS, avec également de grands organismes de recherche publics qui s'occupent des enjeux de régulation de données en relation avec les grandes entreprises du numérique. Les entreprises de transfert de connaissance (y compris le système de conseil agricole dédié à l'accès à des capitaux externes) conseillent les grandes exploitations. Des programmes intensifs de formation continue pour les adultes aident les agriculteurs à acquérir des connaissances et des pratiques sur l'utilisation des technologies, de l'automatisation et des robots.

Dans le cadre du scénario 2, un AKIS étendu à l'ensemble de la chaîne alimentaire et axé sur les microbiomes

En 2050, le système de connaissance et d'innovation et la formation se concentrent sur les microbiomes. L'AKIS s'est étendu à l'ensemble des activités de la chaîne de valeur. Les partenariats de recherche publics et privés ont construit de nouvelles infrastructures de données et de connaissances sur l'hobionte des plantes, le microbiome du sol, le microbiome alimentaire et le microbiome humain. Les dynamiques d'apprentissage des agriculteurs sont portées par l'éducation, le conseil public et le conseil privé sur les nouvelles technologies telles que le suivi, les capteurs et la gestion des cultures, au moyen de plates-formes de partage entre agriculteurs.

Dans le cadre du scénario 3, des AKIS localisés et adaptés au contexte local

En 2050, l'AKIS se construit autour d'universités de petite taille intégrées aux réseaux d'acteurs locaux incluant les entreprises, les habitants et les consommateurs. Les laboratoires vivants jouent un rôle clé dans les processus d'innovation. Ils travaillent sur la co-construction de connaissances sur la diversification des cultures, l'aménagement

des paysages, et les pratiques favorisant la biodiversité. La formation des ingénieurs et conseillers agricoles est axée sur la co-construction de connaissances avec les agriculteurs. La formation des agriculteurs porte sur la gestion des paysages et l'agroécologie. Des plates-formes de partage entre agriculteurs accélèrent le processus d'apprentissage. Pour renforcer le développement des connaissances, les centres locaux sont bien connectés au sein d'un réseau européen.

■ Les changements de régime alimentaire

Tendances d'évolution des régimes alimentaires en Europe

La transition nutritionnelle

Au cours des dernières décennies, l'Europe a connu une transition nutritionnelle, favorisée par l'augmentation des revenus, l'urbanisation et la disponibilité d'aliments transformés et bon marché. Entre 1961 et 2013, les quantités de viande (en particulier de la volaille), d'huiles végétales, de poisson et de fruits disponibles pour la consommation en Europe et dans toutes les régions européennes ont augmenté de manière très importante. La disponibilité des sucres et des légumes a également augmenté, mais pas dans toutes les régions européennes. À l'inverse, la disponibilité des légumineuses a diminué dans l'ensemble de l'Europe et dans toutes les régions européennes, à l'exception de l'Europe du Nord (Birt *et al.*, 2017 ; figure 4.5).

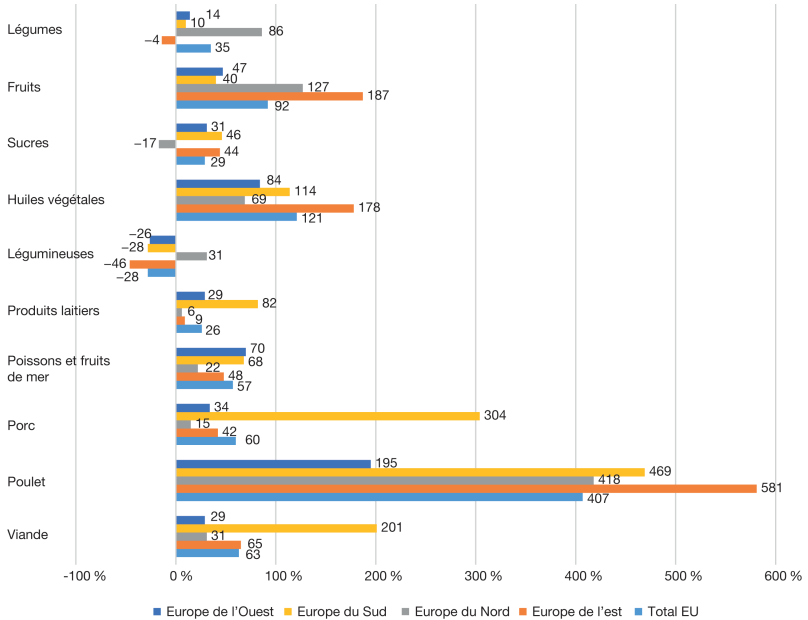
Au cours de la dernière décennie, les habitudes alimentaires des Européens ont très peu évolué, confirmant pour l'essentiel les tendances passées (Riccardi *et al.*, 2020). Il existe des disparités entre les régions européennes, bien que toutes, y compris la région méditerranéenne, connaissent une « occidentalisation » de leur régime alimentaire (Balanza *et al.*, 2007).

En outre, malgré les progrès considérables réalisés au cours des dernières décennies, la sécurité alimentaire et l'accessibilité financière restent un problème dans l'UE, avec 33 millions de personnes qui ne peuvent pas se permettre un repas de qualité tous les deux jours et qui ont besoin d'une aide alimentaire (EC, 2020a).

Les conséquences sur la santé humaine : une augmentation des maladies chroniques

Du fait de la transition nutritionnelle décrite plus haut, ainsi que des changements de mode de vie, la malnutrition s'est développée en Europe, avec des conséquences sur l'augmentation du surpoids, de l'obésité et des maladies chroniques non transmissibles liées à l'alimentation (Mora, 2018). Ainsi, au cours des quarante dernières années, la prévalence de l'obésité a été multipliée par trois dans plusieurs pays européens. L'évolution des régimes alimentaires, avec des apports caloriques excédentaires, explique au moins en partie l'augmentation de l'indice de masse corporelle (IMC) et de l'obésité (Doytch *et al.*, 2016). En 2019, 53 % de la population adulte (âgée de 18 ans et plus) était en surpoids et 17 % de la population adulte était obèse (Eurostat, 2022).

Figure 4.5. Évolution de la disponibilité de différentes catégories d'aliments en Europe et dans les régions européennes entre 1961 et 2013



Les valeurs sont indiquées en pourcentage de kilocalories par personne et par an (% kcal/per/an)
 Source : Birt *et al.*, 2017, à partir des données FAOStat.

Les régimes alimentaires déséquilibrés sont l'un des principaux facteurs de risque des maladies non transmissibles liées à l'alimentation, en particulier les maladies cardiovasculaires, le diabète et certains cancers. On estime que dans l'UE en 2017, plus de 950 000 décès (20 %) et plus de 16 millions d'années de vie en bonne santé perdues étaient imputables aux régimes alimentaires (Global Burden of Disease [GBD] 2017 Diet Collaborators, 2019). Selon la base de données GBD, en 2015, ces facteurs de risque alimentaires sont à l'origine de 50,4 % des décès par maladie cardiovasculaire chez les hommes en 2015 dans l'UE, et de 41,5 % de ces décès chez les femmes (Wilkins *et al.*, 2017). Concernant le diabète de type 2, selon les estimations de la Fédération internationale du diabète (IDF, pour *International diabetes federation* en anglais), en 2021, 59 millions d'adultes vivent avec le diabète en Europe (couvrant 59 pays), ce qui représente près de 9 % de la population de la région pour ce groupe d'âge (IDF, 2021). Cette prévalence a augmenté au cours des dernières années.

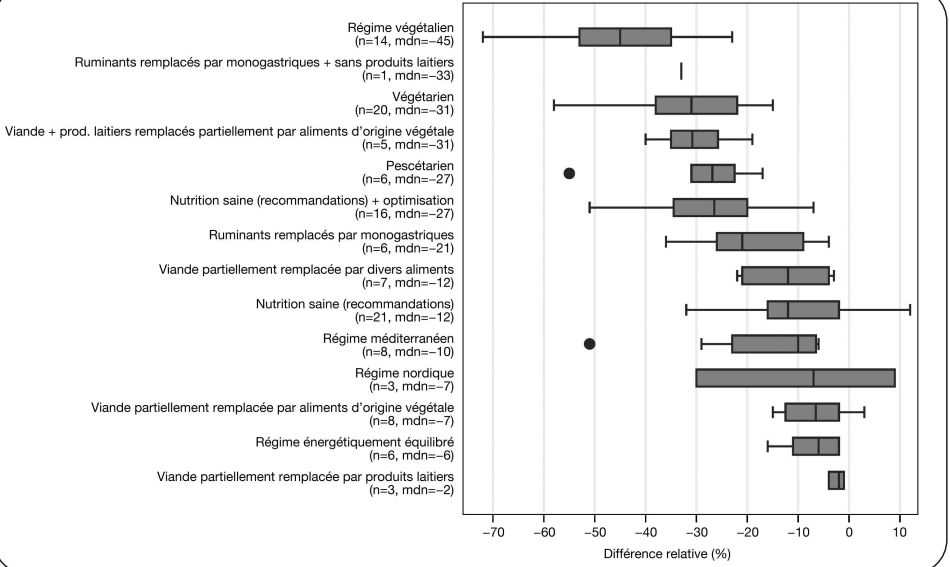
Dans l'UE, les régimes alimentaires déséquilibrés actuels se caractérisent par un apport calorique élevé, une consommation excessive de graisses saturées, de graisses trans, de sucre, de sel, ainsi que de viande transformée, et une faible consommation de légumes, de fruits et de céréales complètes (Vereecken *et al.*, 2015 ; FAO *et al.*, 2017). Ce changement de régime alimentaire résulte pour une large part d'une transformation de la chaîne alimentaire qui a favorisé les aliments manufacturés ultratransformés, à forte densité énergétique, et les boissons sucrées (Imamura *et al.*, 2015 ; Monteiro *et al.*, 2019). Les groupes de population les plus pauvres sont particulièrement exposés à ces changements alimentaires, car ils ont tendance à remplacer les aliments sains par des aliments transformés bon marché et pratiques (De Schutter *et al.*, 2020). Les aliments ultratransformés et les boissons sucrées sont devenus facilement accessibles, font l'objet d'une forte promotion, en particulier auprès des enfants, et sont moins chers que les aliments frais ou peu transformés (Vandevijvere et Swinburn, 2015). Cela a conduit à la création d'environnements alimentaires non sains, qui limitent l'accès à des régimes alimentaires sains et abordables, et sont devenus des facteurs majeurs d'inégalités dans les régimes alimentaires des populations pauvres en Europe (Pineda *et al.*, 2022). Le coût d'une mauvaise alimentation en Europe est considérable et ne cesse d'augmenter. On estime que les maladies non transmissibles, pour lesquelles l'alimentation constitue l'un des principaux facteurs de risque, génèrent dans l'UE des coûts de santé annuels supérieurs à 300 milliards d'euros, ainsi que des coûts liés aux pertes de productivité et aux soins informels de 200 milliards d'euros (Pineda *et al.*, 2022).

Les conséquences sur l'environnement : un dépassement des limites planétaires

De nombreux auteurs ont montré que la consommation accrue d'aliments à forte densité énergétique, d'aliments ultratransformés et de produits animaux contribue à la dégradation de l'environnement (Willett *et al.*, 2019 ; Tilman et Clark, 2014 ; Bodirsky *et al.*, 2020 ; FAO, 2022b), en augmentant les émissions de gaz à effet de serre, les usages d'eau, les flux d'azote et de phosphore, les surfaces de terres cultivées et en favorisant la perte de biodiversité. Par exemple, on estime que la production alimentaire et les régimes alimentaires actuels en Europe sont responsables de plus de 25 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (Mertens *et al.*, 2019).

En ce qui concerne la dynamique d'évolution, Bajan *et al.* (2022) ont montré que les émissions totales de gaz à effet de serre provenant de la production alimentaire (de la production des intrants à la distribution des aliments au consommateur final) dans l'UE ont diminué entre 2010-2013 et 2014-2017. Toutefois, leur part dans les émissions totales de gaz à effet de serre a augmenté au cours de la même période, passant de 20,3 % à 21,7 %, ce qui indique que leur déclin a été plus lent que celui d'autres secteurs de l'économie européenne (Bajan *et al.*, 2022). Aleksandrowicz *et al.* (2016) ont montré que l'adoption de régimes alimentaires plus durables pourrait contribuer à des réductions supérieures à 70 % des émissions de GES (figure 4.6) et de l'utilisation des terres, et à 50 % des usages d'eau, par rapport au régime alimentaire occidental typique actuel.

Figure 4.6. Différences d'émissions de gaz à effet de serre entre les régimes moyens actuels et différents types de régimes alimentaires durables (en pourcentage)



n : nombre d'études ; mdn : médiane en pourcentage.
 Source : Aleksandrowicz *et al.*, 2016.

Vers des régimes alimentaires sains et durables ?

Des études nutritionnelles récentes ont permis d'observer certains changements dans les habitudes alimentaires des Européens. Ainsi, une récente étude de cohorte menée auprès de 22 800 participants a montré que l'adhésion au régime méditerranéen a augmenté de manière significative chez les adultes européens de plus de 50 ans entre 2013 et 2019, dans la plupart des treize pays européens suivis (Alves et Perelman, 2022). Dokova *et al.* (2022) ont réalisé une analyse des études portant sur les données relatives à la consommation alimentaire dans divers pays européens entre 1990 et 2020. Ils mettent en évidence différents changements dans les tendances de consommation à travers l'Europe, qui, selon eux, suggèrent des changements vers l'adoption de comportements alimentaires plus sains. Par exemple, entre 2010 et 2019, les apports en sucres ont diminué dans de nombreux pays européens (Espagne, Italie, France, Royaume-Uni).

On peut également noter quelques exemples récents de stratégies de santé publique efficaces sur la modification des comportements alimentaires. Ainsi, en Finlande par

exemple, un programme de prévention visant à réduire la prévalence de la mortalité cardiovasculaire a été mis en œuvre dans les années 1970, en mettant l'accent sur les changements de mode de vie et en particulier sur la réduction des apports en sel et en graisses, ainsi que sur le tabagisme. Quarante ans plus tard, le programme s'est avéré efficace, la mortalité coronarienne ayant été réduite de plus de 84 % entre 1972 et 2014 (Puska et Jaini, 2020 ; Vartiainen, 2018).

Les changements de consommation vers des régimes plus durables peuvent venir d'initiatives individuelles, ou de mouvements de consommateurs, d'associations de consommateurs, etc. Par exemple, en Allemagne, on estime que, si la croissance de la tendance au développement des régimes végétalien ou végétarien se poursuit, d'ici 2045, 42 % des Allemands auront une alimentation principalement végétale (IPES-Food & ETC Group, 2021). D'autres mouvements incluent par exemple l'agriculture à soutien collectif, les jardins communautaires, la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique ; ils sont décrits plus en détail dans la section 3 du chapitre 3.

Hypothèses d'évolution des régimes alimentaires

Sur la base des tendances d'évolution des régimes alimentaires en Europe, trois hypothèses ont été formulées sur l'évolution des régimes en 2050. Dans chacune de ces hypothèses, les régimes alimentaires sont composés d'aliments issus de systèmes agroalimentaires sans pesticides chimiques.

Dans le cadre du scénario 1, une évolution au fil de l'eau des régimes alimentaires

En 2050, les régimes alimentaires en Europe suivent les tendances de 2024, avec seulement des changements marginaux dans les modèles de consommation alimentaire. Ils continuent d'être caractérisés par des niveaux élevés d'apports caloriques, et de consommation de produits animaux, de matières grasses, de sucres et sels ajoutés (stable par rapport à 2024). En conséquence, et en combinaison avec de faibles niveaux d'activité physique et un maintien des produits ultratransformés, l'augmentation de l'obésité et des maladies non transmissibles liées à l'alimentation se poursuit, et les objectifs des politiques publiques en matière d'amélioration de la nutrition, de surpoids et d'obésité ne sont pas atteints.

Dans le cadre du scénario 2, un développement de « régimes sains »

En 2050, les Européens ont adopté des régimes alimentaires sains, grâce à des mesures de santé publique qui ont permis de modifier les comportements alimentaires. Le régime alimentaire sain se caractérise par une réduction des apports énergétiques, une augmentation de la diversité alimentaire et une amélioration de la qualité de l'alimentation caractérisée par une part élevée de fruits et légumes, ainsi que de légumineuses et de céréales diversifiées, et par une faible part de sucre, d'huiles végétales et d'aliments d'origine animale, ainsi que par une faible consommation d'aliments

ultratransformés. Cette hypothèse de régimes alimentaires sains a été développée dans la prospective Agrimonde-Terra qui a produit un scénario de « régimes alimentaires sains » (Mora *et al.*, 2020 ; Le Mouël *et al.*, 2018), qui a été adapté récemment à l'échelle européenne (Tibi *et al.*, 2020).

Dans le cadre du scénario 3, le développement d'un régime « une seule santé »

Les consommateurs européens s'orientent vers des régimes alimentaires qui sont à la fois durables sur le plan nutritionnel et environnemental. La transformation vers ces régimes nécessite de fortes modifications des consommations, vers une alimentation riche en aliments d'origine végétale et comportant moins d'aliments d'origine animale. Ce régime est caractérisé par un doublement de la consommation d'aliments sains tels que les fruits et légumes, les légumineuses, de faibles quantités d'aliments d'origine animale, contenant des graisses insaturées plutôt que saturées, et des quantités limitées de céréales raffinées, d'aliments ultratransformés et de sucres ajoutés. Ce type de régime alimentaire a été élaboré par la Commission EAT-Lancet, avec le régime FLEX (Willett *et al.*, 2019), qui respecte à la fois les recommandations nutritionnelles et les limites planétaires.

5. Les impacts des scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en Europe et dans le monde

Le Mouël C., Forslund A., Kieffer V.

Ce chapitre présente l'évaluation quantitative des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides, qui a été menée à l'aide de la version AE2050 du modèle de bilans de biomasse GlobAgri (le modèle GlobAgri et sa version AE2050 sont décrits en annexe 2). En tant qu'élément d'une approche de simulation couplée à une approche qualitative de prospective, l'évaluation quantitative des scénarios comporte trois étapes. La première étape consiste à traduire les hypothèses d'évolution alternatives des différentes composantes des scénarios en valeurs quantitatives pour les variables et paramètres d'entrée correspondants du modèle. Dans une deuxième étape, les scénarios entiers, qui sont des combinaisons d'hypothèses d'évolution des composantes, sont simulés. Enfin, dans la troisième étape, les résultats de simulation sont analysés et les principaux enseignements qui en résultent sont exposés.

Chacune de ces étapes a été menée avec des experts, au travers d'entretiens individuels ou par le biais d'ateliers (tableau A.8).

Le chapitre est organisé comme suit. La première section décrit la traduction des hypothèses d'évolution alternatives des différentes composantes des scénarios en valeurs quantitatives pour les variables et paramètres d'entrée du modèle. La deuxième section rapporte les résultats de simulation de chaque scénario. Dans la troisième section, les principaux enseignements tirés de ces résultats sont mis en relief.

Notons à ce stade que l'ensemble de l'exercice d'évaluation quantitative de la prospective agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 est décrit de manière très détaillée dans Mora *et al.* (2023). En particulier, des variantes des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides y sont simulées et des résultats complémentaires pour tous les scénarios y sont rapportés, que nous ne reprenons pas ici.

1. La traduction des scénarios en valeurs quantitatives pour les variables et paramètres d'entrée du modèle

Aux trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides, qui ont émergé du processus de prospective, nous ajoutons un scénario de référence. Les quatre scénarios (S1, S2, S3 et Réf.) projettent tous l'agriculture européenne de la situation initiale 2010

(moyenne observée 2009-2011 ; annexe 2) à la situation finale 2050, mais sous différentes hypothèses d'évolution des composantes. Pour chaque scénario, les résultats de simulation donnent donc une image de l'agriculture en 2050, qui peut être comparée à son image en 2010.

Le scénario de référence décrit l'agriculture européenne et dans le reste du monde en 2050 si les tendances actuellement observées sont maintenues de par le monde. Les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides intègrent des changements de tendances dans l'agriculture européenne, mais laissent inchangé ce qui se passe dans le reste du monde. La comparaison de l'image de l'agriculture européenne en 2050 projetée par ces trois scénarios à celle projetée en 2050 par le scénario de référence permet par conséquent d'isoler les effets des seuls changements de tendances portés par les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides.

Comme le montre le tableau morphologique présenté au chapitre 4 (tableau 4.1), les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides sont des combinaisons d'hypothèses d'évolution alternatives de leurs composantes. Il en est de même pour le scénario de référence, l'hypothèse d'évolution de chaque composante correspondant à une poursuite de tendance. Pour simuler les scénarios avec le modèle GlobAgri-AE2050, il est par conséquent nécessaire de traduire chaque hypothèse d'évolution de chaque composante en valeurs quantitatives pour les variables et paramètres d'entrée correspondants du modèle. Cette traduction fait l'objet de cette première section.

Par définition, un modèle est une représentation simplifiée du système réel considéré et ne peut proposer qu'un nombre limité de variables et paramètres pour rendre compte de l'évolution de ce système. Certaines composantes et leurs hypothèses à l'horizon 2050, portées par nos scénarios, sont par conséquent négligées dans l'évaluation quantitative, car il n'existe pas de variables d'entrée ou de paramètres dans le modèle qui permettraient d'en tenir compte. C'est le cas de la composante « Structures agricoles » et de ses hypothèses d'évolution. D'autres composantes ne peuvent être considérées qu'indirectement, car certaines variables d'entrée ou paramètres du modèle peuvent rendre compte de leur évolution à l'horizon 2050, mais seulement de manière implicite et imparfaite. C'est le cas pour les « Chaînes de valeur alimentaires » et les « Agroéquipements et technologies numériques ». Finalement, seules quelques composantes et leurs hypothèses d'évolution peuvent être directement prises en compte dans l'évaluation quantitative, car le modèle contient des variables et des paramètres qui peuvent en rendre compte explicitement. Ces composantes sont les « Systèmes de culture », les régimes du commerce (c'est-à-dire les conditions du commerce international dont, en particulier, les politiques commerciales) dans « Politiques publiques et commerce » et les « Régimes alimentaires ».

■ Le scénario de référence (Réf.)

Notre scénario de référence s'inspire du scénario « Régimes alimentaires tendanciel x Rendements faibles » de l'étude « Place des agricultures européennes dans le

monde à l'horizon 2050 » (étude AE2050 ; Tibi *et al.*, 2020). La plupart de nos hypothèses sont tirées de ce scénario. Cependant, nous avons adopté des hypothèses légèrement modifiées pour les régimes alimentaires en Europe et pour les intensités de culture dans le monde entier.

Régimes alimentaires en Europe

L'étude AE2050 avait choisi d'adopter les projections de l'étude d'Alexandratos et Bruinsma (2012) pour figurer l'évolution à 2050 des régimes alimentaires tendanciels des différentes parties du monde. Pour cette prospective, nous avons actualisé cette hypothèse en utilisant les régimes alimentaires proposés dans le scénario *Business as usual* (BAU) d'une étude plus récente de la FAO (2018b). Ces projections plus récentes supposent une croissance plus faible de la consommation par habitant de produits animaux hors d'Europe, notamment en Asie (en particulier en Chine), par rapport à Alexandratos et Bruinsma (2012). Cela semble plus conforme à l'évolution observée au cours des dernières années.

Pour l'Europe cependant, le scénario BAU de l'étude de la FAO (2018b) implique une augmentation de la consommation par habitant de produits animaux jusqu'en 2050. Cette hypothèse entre en contradiction avec les tendances observées ces dernières années en Europe, où la consommation par habitant de la plupart des produits animaux stagne ou diminue (notamment pour la viande de ruminants), même si les changements observés ne sont pas homogènes dans les sous-régions européennes (tableau A.3). Ainsi, afin de tenir compte de ces tendances récentes de la consommation alimentaire européenne, nous avons remplacé les projections de la consommation par habitant de tous les produits du scénario BAU de la FAO par nos propres projections pour nos sous-régions européennes. Nous avons basé nos propres projections sur les changements observés dans les régimes alimentaires dans les sous-régions européennes entre le début et la fin de la décennie 2010 (moyenne 2010-2011 à moyenne 2017-2019). Ensuite, nous avons supposé qu'il n'y aurait aucun changement supplémentaire entre 2020 et 2050.

Le régime alimentaire européen moyen en 2050 selon nos projections est légèrement différent du régime alimentaire européen moyen en 2050 selon les projections du scénario BAU de la FAO (2018b), avec principalement une teneur énergétique légèrement inférieure (-2 %) et une teneur inférieure en viande bovine (-10 %), en viande de porc (-7 %) et en viande de petits ruminants (-13 %). Par rapport au régime alimentaire de l'année initiale 2010, le régime alimentaire européen projeté pour 2050 est plus riche en énergie, avec des tendances relativement stables.

Dans le modèle GlobAgri-AE2050, l'évolution de la consommation alimentaire totale entre 2010 et 2050 dans chaque grande région résulte à la fois de l'évolution de la population et de l'évolution des régimes alimentaires. Pour le scénario de référence, nous avons supposé que la population des différentes parties du monde évolue conformément à la projection médiane du *World Population Prospect* des Nations Unies (UN, 2017).

Intensités culturelles dans le monde

L'intensité culturelle de chaque région GlobAgri-AE2050 pour l'année initiale 2010 est calculée en divisant la superficie totale récoltée de chaque région (y compris les superficies consacrées aux prairies temporaires en graminées et autres fourrages) par la superficie correspondante de terres arables et en cultures permanentes, deux variables issues des données de la FAO et calculées pour l'année moyenne 2009-2011. Les coefficients d'intensité culturelle comparent donc les superficies récoltées aux superficies cultivées. Lorsque le coefficient est supérieur à un, la superficie récoltée déclarée dans une région est supérieure à sa superficie cultivée déclarée, ce qui signifie que le même hectare est, en moyenne, récolté plus d'une fois par an (par exemple, lorsque plusieurs récoltes par an sont possibles pour un même produit ou lorsque l'hectare peut être emblavé et récolté plusieurs fois de produits différents durant une même année). Lorsque le coefficient est inférieur à un, la superficie récoltée déclarée dans la région est inférieure à la superficie cultivée déclarée, ce qui signifie que certains hectares sont laissés en jachère (puisque la jachère est incluse dans la superficie cultivée, mais n'est bien sûr pas récoltée) ou que certains hectares ont été emblavés mais non récoltés (en raison d'un événement climatique, d'une attaque de ravageurs, ou de conflits, etc.).

En Europe, en 2010, l'intensité culturelle est proche de 1 en Allemagne et en Pologne. Elle est inférieure à 1 pour les autres sous-régions européennes (suggérant des surfaces cultivées plus importantes que les surfaces récoltées). Dans le reste du monde, les intensités culturelles sont le plus souvent inférieures à 1, sauf en Asie, où plusieurs récoltes par an sont possibles, notamment pour le riz. Les intensités culturelles sont particulièrement élevées en Chine et en Inde, et particulièrement faibles en ex-Union soviétique (ex-URSS) et en Océanie (tableau 5.1), ce qui est conforme à d'autres études (par exemple, Ray et Foley, 2013). La littérature existante montre une tendance à la hausse de l'intensité culturelle en moyenne au niveau mondial au cours des deux dernières décennies (par exemple, Ray et Foley, 2013 ; Wu *et al.*, 2018 ; Waha *et al.*, 2020). Certains travaux évaluent également dans quelle mesure l'intensité culturelle pourrait potentiellement augmenter dans les différentes parties du monde au cours des décennies à venir. Ils suggèrent que l'intensité culturelle pourrait augmenter considérablement en Amérique latine, en Afrique et en Asie, tandis que l'Europe et l'Amérique du Nord ne pourraient bénéficier que de gains potentiels très limités. Néanmoins, l'étude la plus récente est beaucoup moins optimiste que les précédentes : Waha *et al.* (2020) estiment qu'une seconde récolte annuelle sur les superficies actuellement emblavées et récoltées une seule fois par an, qui serait mise en œuvre partout où cela semble possible dans le monde, équivaldrait à un gain de surface cultivable mondiale de 395 millions d'hectares (Mha), dans le scénario le plus optimiste. Ce gain est 41 à 46 % inférieur aux estimations des études précédentes qui s'établissaient entre +666 Mha et +736 Mha chez Ray et Foley (2013) et Wu *et al.* (2018), respectivement.

L'étude de la FAO (2018b) envisage également une augmentation de l'intensité culturale dans le monde jusqu'en 2050, dans tous ses scénarios (+6 % en moyenne mondiale dans le scénario BAU). L'étude AE2050 avait adopté l'hypothèse BAU de l'étude de la FAO de 2018 (tableau 5.1). Nous avons considéré que cette hypothèse était trop optimiste pour notre scénario de référence, pour au moins trois raisons. Tout d'abord, notre scénario de référence ne suppose aucun changement significatif dans

Tableau 5.1. Intensités culturales en 2010 et 2050 dans le scénario de référence (Réf.) et en 2050 dans l'étude AE2050

	IC 2010 et 2050 dans Réf.	IC dans AE2050
France	0,83	0,90
Allemagne	0,97	1,05
Royaume-Uni	0,88	0,95
Pologne	0,98	1,07
Europe du Sud	0,77	0,84
Europe de l'Est	0,90	0,97
Europe centrale	0,83	0,90
Reste de l'Europe	0,81	0,88
Canada, États-Unis	0,77	0,88
Brésil, Argentine	0,87	0,88
Reste de l'Amérique	0,85	0,87
Ex-URSS	0,65	0,71
Chine	1,43	1,43
Inde	1,31	1,36
Reste de l'Asie	1,02	1,05
PMO ¹	0,75	0,74
Afrique du Nord	0,78	0,77
Afrique de l'Ouest	0,98	1,02
Afrique ECS ²	0,81	0,83
Océanie	0,62	0,63

IC : intensité culturale ; Réf. : référence

1. Proche-Orient et Moyen-Orient

2. Afrique de l'Est, centrale et du Sud

La composition des sous-régions Europe du Sud, de l'Est, centrale et reste de l'Europe est fournie en annexe 2.

Source : calculs des auteurs, basés sur des données issues de FAOStat et Tibi *et al.* (2020).

les systèmes de culture, ce qui rend difficilement envisageable la réalisation du potentiel d'augmentation de l'intensité culturale, comme mentionné par Waha *et al.* (2020). Ensuite, les estimations existantes sont probablement trop optimistes, car elles ne tiennent pas compte du fait que le potentiel d'augmentation de l'intensité culturale pourrait être limité par la dégradation des sols, le stress biotique, la disponibilité et l'accès aux intrants, etc. Enfin, il n'y a pas consensus sur l'ampleur du potentiel d'augmentation de l'intensité culturale, qui est très différente d'une étude à l'autre. Ainsi, nous avons décidé de maintenir les intensités culturales constantes de 2010 à 2050 dans notre scénario de référence (tableau 5.1).

I Traduction quantitative des hypothèses d'évolution alternatives des composantes « Chaînes de valeur alimentaires » et « Régimes alimentaires »

L'évolution des régimes alimentaires est étroitement liée à celle des chaînes de valeur alimentaires. Pendant le processus de construction des scénarios, trois hypothèses d'évolution alternatives des chaînes de valeur alimentaires à l'horizon 2050 ont été développées :

- Des chaînes de valeur mondiales commercialisant des aliments sans pesticides, le « sans pesticides » étant devenu une norme de sécurité alimentaire.
- Des chaînes de valeur locales, européennes et mondiales commercialisant des aliments sains pour une alimentation saine.
- Des chaînes de valeur territoriales et régionales commercialisant des aliments préservant la santé humaine et environnementale (biodiversité incluse) et contribuant à un paysage diversifié.

Chacune de ces hypothèses a été associée à une hypothèse d'évolution des régimes alimentaires à horizon 2050 (pour le détail des hypothèses de régimes alimentaires, voir chapitre 4, section 2) :

- Lorsque les chaînes de valeur évoluent vers des chaînes de valeur mondiales commercialisant des aliments sans pesticides, comme norme de sécurité alimentaire, nous supposons que les régimes alimentaires en Europe poursuivent leur évolution selon les tendances actuelles, l'accent étant mis sur les produits sans pesticides. En conséquence, les régimes alimentaires européens en 2050 sont les mêmes que ceux adoptés dans le scénario de référence. Toutefois, les produits alimentaires qui entrent dans les régimes alimentaires sont sans pesticides, ce qui n'était pas le cas dans le scénario de référence.
- Lorsque les chaînes de valeur deviennent des chaînes de valeur locales, européennes et mondiales commercialisant des aliments sains pour une alimentation saine, nous supposons qu'en plus d'être basés sur des produits alimentaires sans pesticides, les régimes alimentaires européens évoluent vers des régimes sains. Dans ce cas, les régimes alimentaires en 2050 en Europe sont les régimes alimentaires

sains correspondants de l'étude AE2050 (Tibi et al., 2020), empruntés à la prospective Agrimonde-Terra (Le Mouël et al., 2018).

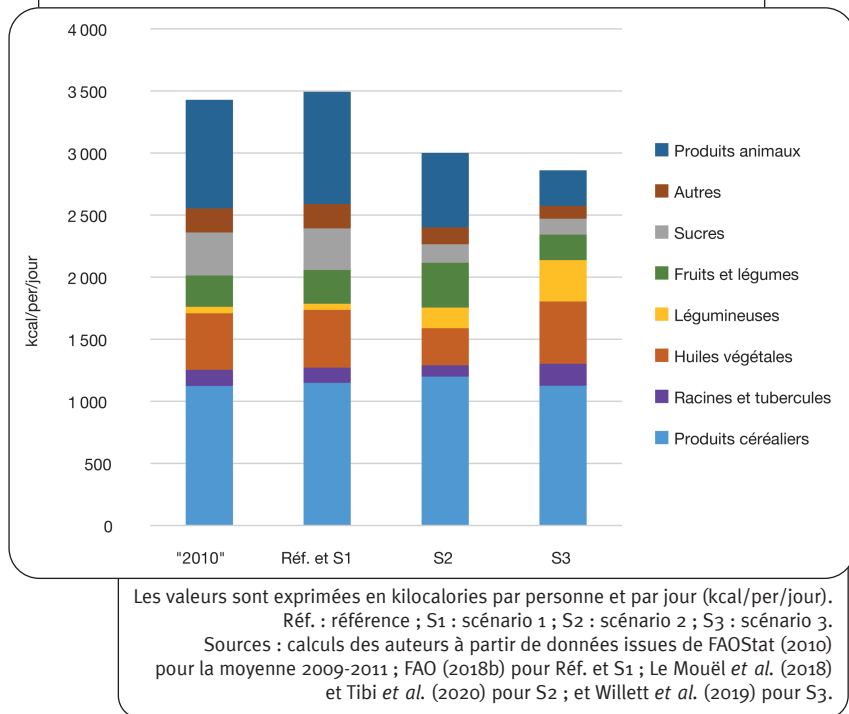
- Lorsque les chaînes de valeur évoluent vers des chaînes de valeur territoriales et régionales commercialisant des aliments préservant la santé humaine et environnementale, nous supposons qu'en plus d'être basés sur des produits alimentaires sans pesticides, les régimes alimentaires européens évoluent vers des régimes favorables, à la fois, à la santé humaine et à la santé animale et environnementale. Pour représenter cette situation, nous avons retenu le régime flexitarien proposé par la Commission EAT-Lancet, car ce régime est censé être un régime alimentaire sain et écologiquement durable (Willet et al., 2019). Dans ce cas, le régime alimentaire de chaque sous-région européenne en 2050 est reconstitué à partir des régimes flexitariens en 2050 de la Commission EAT-Lancet pour les pays composant la sous-région (le passage du régime flexitarien de EAT-Lancet au régime flexitarien de GlobAgri-AE2050 est décrit en détail dans Mora *et al.*, 2023).

La première hypothèse pour les chaînes de valeur alimentaires et son régime alimentaire tendanciel associé est utilisée dans le scénario S1. Le scénario S2 intègre la deuxième hypothèse pour les chaînes de valeur alimentaires et le régime alimentaire sain qui y est associé. La troisième hypothèse pour les chaînes de valeur alimentaires et le régime alimentaire sain et durable associé est intégrée au scénario S3.

La figure 5.1 présente le régime alimentaire moyen pour l'Europe, observé dans la situation initiale 2010 et en 2050 dans le scénario de référence (Réf.) et les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides S1, S2 et S3. Les régimes alimentaires correspondants pour les sous-régions européennes et pour les autres régions du monde sont disponibles dans Mora *et al.* (2023).

Les scénarios intègrent des régimes alimentaires européens différents. Dans les scénarios Réf. et S1, le régime alimentaire en Europe évolue selon les tendances actuelles. Ainsi, en 2050, le régime alimentaire de Réf. et S1 est légèrement plus riche en énergie (en calories), tandis que sa composition est pratiquement inchangée, par rapport à la situation initiale 2010. Dans S2, le régime alimentaire devient plus sain, il est moins riche en énergie et plus diversifié, avec plus de céréales secondaires, de légumineuses et de fruits et légumes, et moins de produits d'origine animale, d'huiles et de sucre. Dans S3, le régime alimentaire est à la fois plus sain et plus respectueux de l'environnement. Son contenu énergétique est encore plus réduit, tandis que les protéines animales sont massivement remplacées par des protéines végétales. En conséquence, le régime alimentaire de S3 est particulièrement pauvre en produits d'origine animale et riche en légumineuses (figure 5.1).

Figure 5.1. Régime alimentaire moyen en Europe en 2010 et en 2050 dans les scénarios de référence, S1, S2 et S3



■ Traduction quantitative des hypothèses d'évolution alternatives de la composante « Systèmes de culture »

Au départ du processus de construction des scénarios, nous avons développé trois stratégies de protection des cultures à l'horizon 2050 pour l'Europe :

- une protection des cultures basée sur le renforcement de l'immunité des plantes ;
- une protection des cultures basée sur la gestion de l'holobionte ;
- et une protection des cultures basée sur la diversification paysagère.

Les systèmes de culture ont ensuite été reconstruits sur la base de ces stratégies alternatives de protection des cultures. Cela a donné lieu à trois hypothèses d'évolution des systèmes de culture à l'horizon 2050. Les scénarios sans pesticides développés dans la prospective intègrent tous les trois hypothèses d'évolution des systèmes de culture, mais une hypothèse est prédominante dans chaque scénario. La première hypothèse est prédominante dans le scénario S1, la deuxième dans le scénario S2 et la troisième dans le scénario S3.

Dans le modèle GlobAgri-AE2050, il existe trois variables ou paramètres d'entrée qui sont directement concernés par l'évolution des systèmes de culture : les rendements des cultures, les ratios d'intensité culturale et les surfaces cultivables.

Dans le scénario de référence (Réf.), les rendements des cultures et les ratios d'intensité culturale évoluent selon les tendances actuelles observées. Les systèmes de culture actuels étant majoritairement des systèmes d'intensification conventionnelle en Europe, les projections à 2050 des rendements et des ratios d'intensité culturale européens dans le scénario de référence représentent les performances productives futures attendues de ces systèmes.

Au contraire, les trois hypothèses pour les systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050 impliquent une rupture par rapport aux systèmes d'intensification conventionnelle actuels puisqu'elles supposent toutes une suppression de l'utilisation de pesticides chimiques. Comment et dans quelle mesure ces trois hypothèses d'évolution des systèmes de culture peuvent-elles modifier les évolutions des rendements, des intensités culturales et des surfaces cultivables maximales en Europe à l'horizon 2050 telles que projetées dans le scénario de référence ? Sommes-nous en mesure de différencier les rendements, les intensités culturales et les surfaces cultivables maximales en 2050 en Europe en fonction de nos hypothèses d'évolution alternatives ?

En ce qui concerne l'intensité culturale et les surfaces cultivables maximales, la littérature et les données existantes fournissent des informations qui peuvent être utilisées pour calibrer leurs valeurs attendues en 2050 dans le cadre des trois hypothèses d'évolution des systèmes de culture. En revanche, en ce qui concerne les rendements des cultures, nous sommes confrontés à un sérieux défi. En effet, les informations existantes ne sont pas directement exploitables, car elles se réfèrent à des systèmes de culture fondamentalement différents des nôtres (systèmes en agriculture biologique ou systèmes conçus pour réduire l'utilisation de pesticides chimiques, mais pas pour supprimer l'usage des pesticides chimiques). En outre, la littérature existante peut fournir des informations sur la performance de pratiques agroécologiques spécifiques, mais rarement sur la performance de systèmes de culture complets qui intégreraient ces pratiques agroécologiques. De plus, au sein de cette littérature, si les études existantes fournissent toutes des informations sur la performance environnementale de pratiques agroécologiques spécifiques, elles sont assez peu nombreuses à rapporter des informations sur leur performance en matière de rendement des cultures. Enfin, lorsque ces informations existent, l'écart de rendement résultant de l'utilisation d'une pratique agroécologique spécifique *versus* sa non-utilisation est le plus souvent calculé quel que soit le système de culture complet (par exemple, méta-analyses sur la diversification des cultures). Dans ce qui suit, nous résumons les informations et données existantes et expliquons comment nous les utilisons pour calibrer l'évolution des rendements, des intensités culturales et des surfaces cultivables en Europe pour les trois hypothèses d'évolution des systèmes de culture en 2050.

Intensités culturelles

Selon la FAO (2018b), l'intensité culturelle devrait augmenter en moyenne mondiale quel que soit le scénario : +6 % entre 2012 et 2050 dans le scénario BAU, +18 % dans le scénario « Vers des systèmes durables » (TSS, pour *Towards sustainability scenario* en anglais). L'étude de la FAO (2018b) prétend en effet qu'une augmentation plus forte est envisageable dans le scénario TSS « grâce à l'adoption de technologies d'intensification durable, assurant une disponibilité suffisante de nutriments dans le sol, car moins d'engrais synthétiques sont utilisés » (FAO, 2018b ; p. 85, traduit en français par les auteurs).

Comme FAO (2018b), nous considérons que l'intensité culturelle pourrait augmenter avec nos trois hypothèses pour les systèmes de culture. De plus, nous supposons que des systèmes de culture plus diversifiés se traduiraient par une utilisation plus intensive des terres cultivées. En d'autres termes, nous supposons une relation positive entre niveau de diversification et ratio d'intensité culturelle. En revanche, nous ne disposons d'aucune information sur l'amplitude potentielle de l'effet de la diversification sur l'intensité culturelle.

Dans FAO (2018b), pour la région Europe et Asie centrale, l'intensité culturelle augmente de +8 % dans le scénario BAU ; et de +22 % dans le scénario TSS, entre 2012 et 2050. Nous avons déjà expliqué que nous n'avons pas utilisé l'augmentation de +8 % du scénario BAU de FAO (2018b) pour notre scénario de référence, car cette augmentation nous semblait trop optimiste à systèmes de culture actuels inchangés. En revanche, ces +8 % d'augmentation nous paraissent raisonnables dans le cadre de nos hypothèses d'évolution des systèmes de culture européens. Nous considérons même que le système de culture le plus diversifié (protection des cultures basée sur la diversification paysagère), utilisé dans le scénario S3, pourrait impliquer une augmentation plus importante de l'intensité culturelle. La hausse de +22 % supposée dans le scénario TSS de FAO (2018b) nous semble néanmoins difficilement atteignable et nous avons décidé de limiter l'augmentation de l'intensité culturelle à +12 % (soit $1,5 \times 8 \%$) pour le système de culture le plus diversifié (scénario S3). Les ratios d'intensité culturelle projetés en 2050 pour les sous-régions européennes, selon les scénarios, sont reportés dans le tableau 5.2.

Superficies maximales cultivables

Dans les quatre scénarios (Réf., S1, S2 et S3), nous supposons que la surface cultivée (surface arable et en cultures permanentes) européenne ne peut pas s'étendre. Cela signifie que la surface cultivable maximale des sous-régions européennes est fixée au niveau de la surface cultivée initiale 2010.

Cette surface cultivable maximale est supposée constante jusqu'en 2050 dans toutes les hypothèses de systèmes de culture, à l'exception de la dernière basée sur la diversification des paysages. En effet, dans cette dernière hypothèse, les paysages sont composés d'une matrice stable d'habitats naturels et semi-naturels, et d'une mosaïque de cultures dont la composition et la configuration peuvent être modifiées. L'établissement de cette matrice stable d'habitats naturels et semi-naturels (HSN) pourrait réduire la surface disponible pour les cultures. Dans le modèle GlobAgri-AE2050, cela entraînerait une réduction de la surface cultivable maximale des sous-régions européennes.

Tableau 5.2. Intensités culturelles en 2050 dans les scénarios Réf., S1, S2 et S3

	Réf.	S1 et S2	S3
France	0,83	0,90	0,93
Allemagne	0,97	1,05	1,09
Royaume-Uni	0,88	0,95	0,99
Pologne	0,98	1,07	1,10
Europe du Sud	0,77	0,84	0,86
Europe de l'Est	0,90	0,97	1,01
Europe centrale	0,83	0,90	0,93
Reste de l'Europe	0,81	0,88	0,91

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3.
Sources : estimations des auteurs, basées sur des données de FAOStat et FAO (2018b).

Pour calibrer cette réduction, nous utilisons les recommandations de Garibaldi *et al.* (2021). Selon cette étude, la littérature scientifique suggère un minimum de 20% de superficie d'habitat naturel dans les paysages où les terres sont utilisées à 80% ou plus par l'agriculture, l'élevage et/ou la foresterie. En outre, Garibaldi *et al.* (2021) précisent que l'objectif minimum de 20 % peut être appliqué à toutes les échelles spatiales, des parcelles individuelles aux paysages dans leur ensemble.

Traduire cette recommandation en une réduction équivalente de la surface cultivable maximale pour les sous-régions européennes dans GlobAgri-AE2050 n'est pas une tâche facile, car la littérature existante est assez confuse : les types de couverture terrestre considérés comme habitats naturels et semi-naturels diffèrent selon les études, tout comme la surface de référence pour l'application de l'objectif HSN. En général, les études qui traitent de l'évaluation de l'impact des politiques de l'UE en direction de l'agriculture adoptent une définition stricte des HSN et se concentrent sur la surface agricole utile (SAU, c'est-à-dire superficie cultivée et surface de prairies permanentes) ou sur la surface de terres cultivées (par exemple, Barreiro-Hurle *et al.*, 2021 ; Mayer *et al.*, 2021). En revanche, les études qui visent à évaluer le potentiel de HSN pour la protection des cultures ou bien la superficie actuelle sous HSN afin d'évaluer dans quelle mesure la fourniture de services écosystémiques peut être assurée, retiennent une définition plus large des HSN et une superficie de référence plus grande (par exemple, Paracchini *et al.*, 2008 ; Holland *et al.*, 2016).

Barreiro-Hurle *et al.* (2021) fournissent une évaluation de l'impact des stratégies européennes « De la ferme à la table » et « Biodiversité ». Pour évaluer l'impact de l'objectif de 10 % de la surface agricole constituée de particularités topographiques à haute diversité biologique, ils considèrent que la superficie occupée actuellement par ces particularités topographiques à haute diversité biologique correspond à la superficie

sous jachère et à la superficie sous éléments paysagers linéaires. Ainsi, ils estiment d'abord les terres en jachère actuelles dans l'UE (4,1 % de la SAU totale). Ensuite, ils ajoutent la superficie actuelle couverte par des éléments paysagers linéaires (0,6 % de la SAU totale). Ils en déduisent alors la superficie supplémentaire nécessaire pour atteindre l'objectif (5,3 % de la SAU totale). Considérant que la SAU totale dans l'UE est d'environ 173 millions d'hectares, cela se traduirait par 9 millions d'hectares de terres agricoles indisponibles pour la production agricole. De même, Mayer *et al.* (2021) proposent, parmi les pratiques agroécologiques considérées dans leur analyse, un objectif de 7 % des terres cultivées sous haies. Cela se traduirait pour l'UE par près de 8 millions d'hectares de terres cultivées si l'on ne tient pas compte des haies déjà présentes (ou 7 millions d'hectares si l'on considère que les haies déjà présentes peuvent être approximées par les éléments linéaires du paysage tels qu'évalués par Barreiro-Hurle *et al.*, et sont toutes situées sur des terres cultivées).

Les études qui s'intéressent aux HSN pour leur impact sur la fourniture de services écosystémiques donnent des résultats sensiblement différents, même lorsqu'elles se concentrent sur les terres agricoles. La principale raison est qu'elles adoptent une définition plus large des HSN. Selon Holland *et al.* (2016), les catégories de couverture terrestre qui contribuent positivement à la protection des cultures sont les habitats ligneux, forestiers, linéaires herbeux, herbacés non pâturés, les prairies à haute valeur naturelle. Cela représente une superficie bien plus importante que les terres en jachère et les terres sous éléments paysagers linéaires tels que considérés par Barreiro-Hurle *et al.* et Mayer *et al.* Dans la même veine, pour évaluer les terres agricoles à haute valeur naturelle (HVN) en Europe, Paracchini *et al.* (2008) adoptent un large ensemble de catégories d'occupation du sol concernées. Ils estiment que, pour les États membres de l'UE, en moyenne 30 % du total des terres agricoles de l'UE sont déjà HVN, cette part allant de 5 % au Danemark à 78 % en Slovaquie. Comparés à l'objectif de 20 % de Garibaldi *et al.*, les résultats de Paracchini *et al.* suggèrent que seuls l'Allemagne (part de HVN de 14,6 %), le Danemark (5 %), la Lituanie (15,1 %), le Luxembourg (9 %) et les Pays-Bas (14,1 %) seraient contraints de détourner des terres de la production agricole (environ 2 millions d'hectares).

Dans le scénario S₃, nous considérons les HSN qui contribuent positivement à la protection des cultures. Nous adoptons donc une définition large des HSN, en accord avec Paracchini *et al.* (2008) et Holland *et al.* (2016). En utilisant les catégories et les données de couverture terrestre du zonage agroécologique mondial (*Global agro-ecological zones* [GAEZ], en anglais) de la FAO, nous calculons la part de surface en HSN dans chaque cellule de la grille de cinq minutes d'arc (correspondant pour l'Europe à une surface variant de 27 à 75 km²) présentant une surface cultivable positive, dans les huit sous-régions européennes. Sont considérées comme HSN, les catégories GAEZ : Prairies, Terres couvertes de taillis et d'arbustes, Terres couvertes d'arbres, Mangroves et Terres herbacées régulièrement inondées. Le tableau 5.3 rapporte, pour chaque sous-région, la proportion de cellules de la grille où l'objectif de 20 % de HSN

est déjà atteint, et la surface supplémentaire qui devrait être mise sous HSN pour atteindre cet objectif. De manière cohérente, nos résultats sont plus proches de ceux de Paracchini *et al.* (2008). Nous estimons que pour l'Europe dans son ensemble, l'objectif de 20 % de HSN nécessiterait une réduction de -3,5 millions d'hectares de la surface cultivable maximale, les plus fortes réductions se situant en Europe du Sud (près de -1 Mha), en Europe de l'Est et dans le reste de l'Europe (environ -0,6 Mha chacun) et en France et au Royaume-Uni (environ -0,4 Mha chacun).

Tableau 5.3. Surface supplémentaire en habitats semi-naturels nécessaire pour atteindre l'objectif de 20 % préconisé par Garibaldi *et al.* (2021) dans les sous-régions européennes

	Proportion de cellules où l'objectif de 20 % est déjà atteint	Surface supplémentaire requise pour atteindre l'objectif de 20 % (1 000 ha)
France	0,80	428
Allemagne	0,94	116
Royaume-Uni	0,61	462
Pologne	0,97	24
Europe du Sud	0,39	970
Europe de l'Est	0,68	661
Europe centrale	0,63	145
Reste de l'Europe	0,62	666
Total Europe		3 472 (3 % surface cultivée ; 2 % SAU)

Source : calcul des auteurs, basé sur les données géolocalisées de GAEZ v4.

Rendements des cultures

La littérature existante traitant de la relation entre usage de pesticides et rendements des cultures est abondante, mais elle ne fournit pas d'informations directement exploitables pour cette prospective. Les informations qu'elle nous offre sont en effet obtenues dans des contextes différents du nôtre. Avec l'aide des experts que nous avons sollicités (tableau A.8), nous sommes néanmoins partis de cette information et l'avons adaptée à nos propres hypothèses.

Dans un premier temps, nous avons sélectionné quelques études que nous considérons comme représentatives de la littérature existante, tout en étant les plus complètes et relativement récentes. Le tableau 5.4 fournit une brève synthèse des informations disponibles dans ces études sélectionnées.

Il suggère qu'il existe différents courants dans la littérature traitant de la relation entre pesticides et rendements des cultures, chaque courant plaçant cette relation dans un contexte différent. Le premier courant rassemble les études évaluant la perte de rendement réelle due aux bioagresseurs dans les systèmes de culture actuels (c'est-à-dire utilisant des pesticides chimiques). Pour l'ensemble de l'Europe, la perte estimée est d'environ -20 %, quelle que soit la culture. Le deuxième courant de littérature concerne les études qui évaluent l'impact sur les rendements des cultures de l'interdiction de l'utilisation des pesticides chimiques sans adaptation concomitante des systèmes de culture actuels. Ce type d'études permet, dans le même temps, d'évaluer la productivité des pesticides chimiques dans les systèmes de culture actuels. De manière cohérente, ces études anticipent des chutes de rendement importantes : en moyenne mondiale de -50 % pour le blé à -77 % pour le riz et -75 % pour les pommes de terre. Le troisième courant regroupe les études qui s'intéressent à l'impact sur les rendements des cultures d'une réduction de 50 % de l'utilisation des pesticides chimiques. Ces études explorent la littérature existante et sur cette base adoptent l'hypothèse qu'une réduction de 50 % de l'utilisation de pesticides chimiques entraînerait une diminution moyenne de 10 % du rendement des cultures en Europe (une étude estime que la diminution va de -2 % pour le maïs à -20 % pour les fruits et légumes). Le quatrième courant de littérature rassemble les études traitant de l'impact d'une diminution drastique de l'utilisation des pesticides chimiques en Europe lorsque les systèmes de culture sont ajustés de manière cohérente pour pallier la perte de cet intrant. Les estimations de la baisse de rendement des cultures en France vont de -10 à -40 % pour le blé, -10 % pour le maïs, de -10 à -20 % pour le colza, -4 % pour les légumineuses, -19 % pour les pommes de terre, de -9 à 0 % pour la betterave sucrière, et de -20 à -40 % pour les fruits et légumes. Enfin, le cinquième courant de littérature regroupe les études comparant les rendements dans les systèmes de culture en agriculture biologique aux rendements dans les systèmes de culture conventionnels. Il s'agit de méta-analyses bien connues, qui concluent qu'en moyenne, les rendements biologiques sont inférieurs de 19 % à 25 % aux rendements conventionnels. Dans certaines de ces études, les analyses de sensibilité indiquent que cette perte peut être réduite de moitié si l'on ne retient dans l'échantillon étudié que les meilleures pratiques en agriculture biologique.

Dans un deuxième temps, nous avons examiné l'étude de Tibi *et al.* (2022) qui ont réalisé une revue exhaustive de la littérature sur la relation entre la diversification des couverts végétaux et la protection des cultures. Cette revue indique qu'il existe un lien positif entre les pratiques de diversification des cultures (mélange de variétés, mélange d'espèces, cultures intermédiaires, rotation diversifiée, etc.) et les rendements des cultures, et un lien neutre entre les éléments semi-naturels du paysage (haies, agroforesterie, prairies permanentes, etc.) et les rendements des cultures. L'effet potentiel des pratiques de diversification des cultures sur les rendements serait significatif et se situerait entre +2 % et +47 %, avec notamment un effet significatif des rotations (+10 à +20 % de gain de rendement) et des mélanges d'espèces (+20 à +40 %).

Tableau 5.4. Impact de la réduction de l'utilisation de pesticides sur les rendements des cultures en Europe : que nous dit la littérature existante ?

	Systèmes de culture actuels avec usage de pesticides – pertes de rendements réelles	Suppression de l'usage des pesticides dans les systèmes de culture actuels	Réduction de 50 % de l'usage des pesticides – ajustement à la marge des systèmes de culture actuels	Réduction drastique de l'usage des pesticides – ajustement concomitant des systèmes de culture actuels	Systèmes de culture en agriculture biologique
Céréales					
Europe			-10 % ^h		
Allemagne (1929)				-20 % ^a	
Blé					
Moyenne monde	-28 % ^a ; -21 % ^b	-50 % ^a			-27 % ⁱ
Europe	-22 % ^b		-6 % ^g		
France				-10 % ^c ; [-20-40] % ^d ; [-20-30] % ^e	-23 % ⁱ
Suisse				[-21-26] % ^f	
Maïs					
Moyenne monde	-31 % ^a ; -22 % ^b	-69 % ^a			-11 % ⁱ
Europe	-22 % ^b		-2 % ^g		
France				-10 % ^c	-19 % ⁱ
Riz					
Moyenne monde	-37 % ^a ; -30 % ^b				-6 % ⁱ
Europe	-30 % ^b				
France		-77 % ^a			-14 % ⁱ
Cultures riches en protéines					
Europe			-10 % ^h		
Soja					
Moyenne monde	-26 % ^a ; -21 % ^b	-60 % ^a			-8 % ⁱ
Europe	-20 % ^b				
Colza					
Europe			-8 % ^g		
France				-19 % ^c ; [-10-20] % ^d	
Légumineuses					
France				-4 % ^c	

Racines et tubercules			
Europe		-10 % ^h	-26 % ⁱ
Pommes de terre			
Moyenne monde	-40 % ^a ; -17 % ^b	-75 % ^a	-30 % ⁱ
Europe		-17 % ^b	-30 % ⁱ
Allemagne (1929)			-30 % ^a
France			-19 % ^c ; -36 % ⁱ
Betteraves à sucre			
Europe		-12 % ^g ; -10 % ^h	
Allemagne (1929)			-15 % ^a
France			-9 % ^c ; 0 % ^d ; -4 % ⁱ
Fruits et légumes			
Europe		-[15-20] % ^g ; -10 % ^h	-[20-40] % ⁱ
France			-[20-40] % ^c ; -31 % ⁱ
Toutes cultures			
Moyenne monde			-20 % ⁱ ; -25 % ; -13 % (mise en œuvre des meilleures pratiques d'agriculture biologique) ⁱ ; -19 % ^k

(a) Oerke *et al.* (2006) ; (b) Savary *et al.* (2019) ; (c) Butault *et al.* (2009) ; (d) Cellier *et al.* (2018) ; (e) Hossard *et al.* (2014) ; (f) Möhring et Finger (2022) ; (g) Bremmer *et al.* (2021) ; (h) Barreiro-Hurlé *et al.* (2021) ; (i) Ponti *et al.* (2012) ; (j) Seufert *et al.* (2012) ; (k) Ponisio *et al.* (2015).

Dans un troisième temps, sur la base des informations existantes issues de notre revue de la littérature, nous avons établi les hypothèses quantitatives pour les rendements des cultures en 2050 dans les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides. Les rendements futurs des systèmes de culture sans pesticides étant très incertains, nous proposons deux séries d'hypothèses :

- Les systèmes de culture sans pesticides chimiques pourraient entraîner une diminution du rendement des cultures par rapport aux systèmes conventionnels actuels. Dans ce cas pessimiste, la perte de rendement ne serait néanmoins pas supérieure à la perte de rendement estimée pour les systèmes biologiques. Conformément à la littérature existante, nous supposons que la perte serait égale à la moitié de l'écart entre rendements biologiques et rendements conventionnels. Pour calibrer la perte

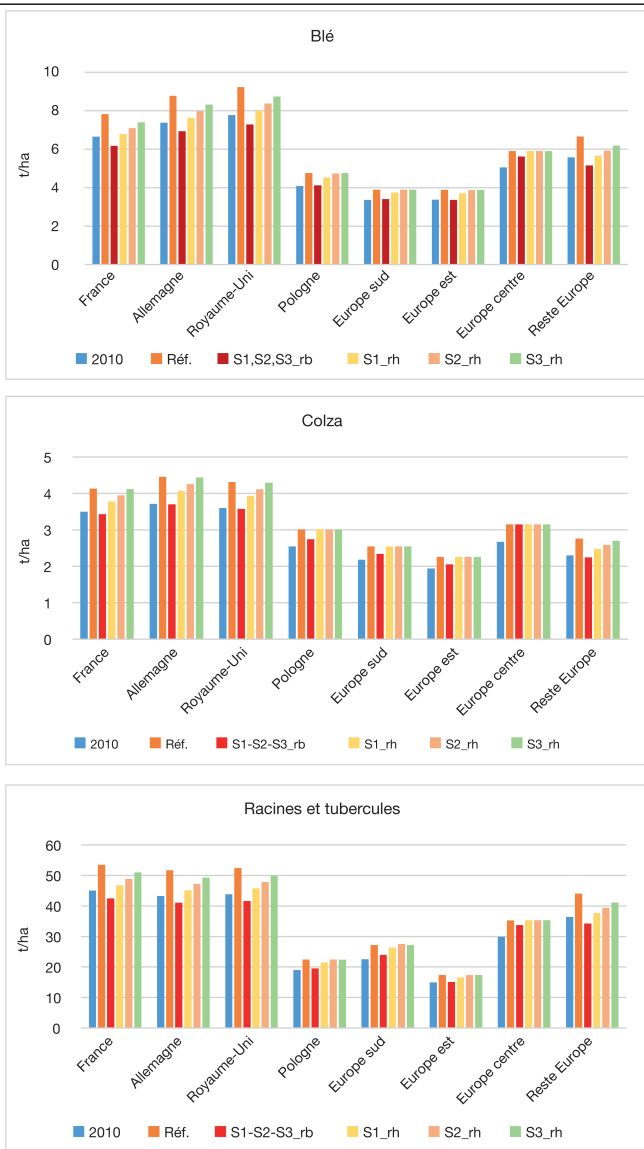
de rendement, nous avons décidé d'utiliser la méta-analyse de Ponti *et al.* (2012), car elle fournit des résultats plus détaillés en ce qui concerne les cultures et les pays ou régions considérés. Les pertes calibrées sont appliquées aux rendements des cultures, projetés en 2050 dans le scénario de référence. Elles ne sont pas différenciées en fonction des scénarios. Les niveaux de rendement des cultures qui en résultent sont qualifiés de rendements bas (rb). Ils correspondent à la limite basse de la fourchette des rendements en 2050 dans nos trois scénarios. Ils sont systématiquement inférieurs aux rendements en 2050 du scénario de référence (figure 5.2).

- En raison du lien positif entre la diversification des cultures et les rendements, les systèmes de culture sans pesticides chimiques pourraient permettre de limiter, voire de surcompenser, les pertes susmentionnées. Dans ce cas optimiste, le gain de rendement ne serait cependant pas supérieur au gain de rendement dû à la diversification des cultures, tel qu'il est estimé dans la littérature existante. Compte tenu du fait que la diversification des cultures varie d'un scénario à l'autre, nous supposons dans ce cas que les gains de rendement sont différents d'un scénario à l'autre. Nous retenons une réponse moyenne des rendements de +20 % à la diversification des cultures. Nous supposons que le scénario S1, qui présente la plus faible diversification des cultures, permettrait d'atteindre la moitié de cette réponse, tandis que le scénario S2 permettrait d'atteindre les trois quarts de la réponse et le scénario S3, qui présente la plus grande diversification végétale, permettrait d'atteindre la totalité de la réponse. Les gains de rendement calibrés sont appliqués à la limite basse de la fourchette des rendements en 2050, c'est-à-dire aux rendements bas (rb) précédents. Les rendements obtenus peuvent être inférieurs, égaux ou supérieurs aux rendements de référence. Dans ce dernier cas, nous avons plafonné leur niveau au niveau de rendement de référence correspondant. Les niveaux de rendement des cultures qui en résultent sont qualifiés de rendements hauts (rh) (figure 5.2).

La figure 5.2 présente les rendements calibrés en 2050 pour plusieurs cultures, pour les huit sous-régions européennes, pour les quatre scénarios (Réf., S1, S2 et S3), sous les deux hypothèses (rb et rh) en ce qui concerne les scénarios S1, S2 et S3. Les niveaux de rendement des cultures en 2050 correspondants pour toutes les cultures sont disponibles dans Mora *et al.* (2023).

Quelle que soit la culture, les rendements dits bas (rb) sont inférieurs aux rendements correspondants du scénario de référence dans toutes les sous-régions européennes. L'ampleur de l'écart entre les deux rendements varie selon les cultures et les sous-régions, à l'instar de l'écart entre les rendements biologiques et conventionnels dans Ponti *et al.* (2012). Pour la plupart des cultures, l'hypothèse des rendements bas entraîne une diminution des rendements par rapport aux rendements de la situation initiale 2010 en France, en Allemagne, au Royaume-Uni et dans le reste de l'Europe, tandis qu'en Pologne, en Europe du Sud, de l'Est et en Europe centrale, ils restent généralement supérieurs aux rendements initiaux.

Figure 5.2. Rendements en 2010 et en 2050 dans le scénario de référence (Réf.) et les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides (S1, S2 et S3, avec rb ou rh) pour quelques cultures dans les huit sous-régions européennes



Les valeurs sont exprimées en tonnes par hectare (t/ha).

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ;

S3 : scénario 3 ; rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.

Source : calculs des auteurs à partir de données issues de FAOStat (2010) et de Tibi *et al.* (2020) pour Réf. ; de Ponti *et al.* (2012) pour S1-S2-S3_rb, de Tibi *et al.* (2022) pour S1_rh, S2_rh et S3_rh.

Du fait de notre décision de plafonner les rendements dits hauts (rh) au niveau des rendements correspondants du scénario de référence, ces rendements sont toujours inférieurs ou égaux aux rendements de référence, quelle que soit la culture et dans toutes les sous-régions européennes. Pour la plupart des cultures, les rendements hauts sont inférieurs aux rendements de référence quel que soit le scénario (même avec le scénario S3) en France, en Allemagne, au Royaume-Uni et dans le reste de l'Europe. En Pologne, en Europe du Sud, en Europe de l'Est et en Europe centrale, ils sont légèrement inférieurs (scénario S1) ou atteignent (scénarios S2 et S3) les rendements de référence pour la plupart des cultures. Pour toutes les cultures et toutes les sous-régions européennes, les rendements hauts sont plus élevés que les rendements de la situation initiale 2010.

I Traduction quantitative des hypothèses d'évolution des régimes du commerce de la composante « Politiques publiques et commerce »

Dans les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides, les régimes alimentaires européens sont constitués exclusivement d'aliments produits sans pesticides chimiques. Les filières et les marchés qui commercialisent les produits sans pesticides qui constituent ces régimes alimentaires ne pourraient pas voir le jour en 2050 en Europe si les produits alimentaires concurrents, produits à l'étranger à l'aide de pesticides, pouvaient continuer d'entrer librement sur les marchés européens. En conséquence, l'émergence de chacun des trois scénarios suppose implicitement que l'Europe (plus précisément, dans le modèle, les huit sous-régions européennes) renforce les barrières à l'importation de produits agricoles et alimentaires, produits à l'aide de pesticides chimiques, en provenance des régions non européennes.

Dans nos trajectoires de transition, les hypothèses d'évolution alternatives des politiques publiques et du commerce envisagent deux options pour les politiques commerciales liées aux pesticides en 2050 (pour le détail des hypothèses sur les politiques publiques et le commerce, voir chapitre 4, section 2) :

- En 2050, les réglementations sur les pesticides ont été harmonisées au niveau mondial par le biais du *Codex alimentarius* et de l'OMC. Tous les produits alimentaires échangés sur les marchés mondiaux doivent être conformes à ces nouvelles règles internationales : ils doivent avoir été produits sans pesticides chimiques.
- En 2050, les accords commerciaux bilatéraux comprennent des clauses miroirs ou de réciprocité, relatives à la santé humaine, animale et environnementale. L'Europe a décidé d'exiger que les produits agroalimentaires importés soient conformes aux règles sanitaires et environnementales en vigueur dans les secteurs et marchés agroalimentaires européens. Par conséquent, les produits agroalimentaires étrangers entrant sur les marchés européens doivent être produits sans pesticides chimiques. Des exigences supplémentaires liées à la qualité nutritionnelle des aliments (visant à limiter l'importation d'aliments ultratransformés notamment) ou à la durabilité des systèmes agroalimentaires (visant à limiter l'importation de produits

préjudiciables à l'environnement, notamment les produits alimentaires d'origine animale et les aliments pour animaux) peuvent également être prises en compte.

Dans le modèle GlobAgri-AE2050, deux paramètres d'entrée sont concernés par l'évolution des politiques commerciales à l'horizon 2050 : les coefficients d'importation (c'est-à-dire pour chaque produit et dans chaque région, la part des importations dans l'utilisation intérieure totale) et les parts d'exportation (c'est-à-dire pour chaque produit et dans chaque région, la part des exportations sur les marchés mondiaux).

Nous proposons de traduire les deux hypothèses d'évolution alternatives des politiques commerciales de la manière suivante :

- Dans la première hypothèse, nous supposons que les coefficients d'importation et les parts d'exportation des sous-régions européennes restent inchangés. Comme tous les produits alimentaires échangés sont considérés comme des produits alimentaires exempts de pesticides, il n'est pas nécessaire de protéger le marché intérieur des sous-régions européennes. Du côté des exportations, les produits alimentaires européens et étrangers sont indifférenciés et nous supposons que les positions exportatrices des pays sur les marchés mondiaux restent inchangées.
- Dans la deuxième hypothèse, nous supposons que les coefficients d'importation et les parts d'exportation sont réduits. Les produits concernés et l'ampleur des réductions varient en fonction de deux facteurs : le contenu des clauses miroirs ou de réciprocité incluses dans les accords commerciaux bilatéraux et la capacité des pays étrangers à se conformer aux règles européennes et leur volonté de signer des accords commerciaux bilatéraux avec l'Europe.

La première hypothèse est intégrée dans le scénario S1, tandis que la seconde hypothèse est associée aux scénarios S2 et S3. Néanmoins, le contenu des clauses miroirs ou de réciprocité incluses dans les accords bilatéraux est différent dans les deux scénarios. Dans le scénario S2, les clauses miroirs ou de réciprocité concernent les produits agroalimentaires qui sont produits avec pesticides chimiques d'une part, et ceux qui sont considérés comme étant de mauvaise qualité nutritionnelle (les aliments ultratransformés notamment) d'autre part. Dans le scénario S3, une préoccupation supplémentaire est incluse dans les clauses miroirs et de réciprocité : l'exigence que les produits agroalimentaires échangés proviennent de systèmes agroalimentaires considérés comme durables.

Lorsque les restrictions commerciales s'appliquent aux produits issus de processus utilisant des pesticides chimiques, elles ne concernent que les produits végétaux destinés à l'alimentation humaine. Ces restrictions ne s'appliquent donc pas aux produits animaux, ni aux produits végétaux et animaux destinés à d'autres usages que l'alimentation humaine (par exemple, dans GlobAgri-AE2050, les fibres destinées à des usages industriels ou les tourteaux protéiques destinés à l'alimentation animale). Nous supposons en outre que ces restrictions commerciales ne s'appliquent pas à certains produits végétaux ne pouvant pas être produits en Europe en raison des conditions agroclimatiques, alors qu'ils restent présents dans les régimes alimentaires européens

(par exemple, l'huile de palme ou le café, cacao, thé, etc., de l'agrégat « Autres produits végétaux » dans GlobAgri-AE2050).

Selon Mertens *et al.* (2022), les cinq principaux aliments ultratransformés consommés par les adultes européens sont : les produits de boulangerie fine, les saucisses, les sauces, les margarines et les plats préparés. La classification élaborée par Monteiro *et al.* (2019) définit les ingrédients caractéristiques des aliments ultratransformés : ce sont soit des produits transformés qui ne sont pas ou très peu utilisés en cuisine traditionnelle, soit des additifs dont la fonction est de rendre le produit final appétissant et attrayant (arômes, exhausteurs de goût, colorants, émulsifiants, édulcorants, épaississants, gélifiants, etc.). Dans la première catégorie, on trouve principalement diverses variétés de sucres (fructose, sirop de maïs à haute teneur en fructose, concentrés de jus de fruits, sucre inverti, maltodextrine, dextrose, lactose), des huiles modifiées (huiles hydrogénées ou interestérifiées) et différentes sources de protéines (protéines hydrolysées, isolat de protéines de soja, gluten, caséine, protéines de lactosérum, minéral de viande). Dans GlobAgri-AE2050, la nomenclature de produits utilisée est très éloignée des critères de classification des produits ultratransformés, ce qui rend difficile le choix des produits concernés par des clauses miroirs ou de réciprocité pour cause de mauvaise qualité nutritionnelle. Nous avons donc posé une hypothèse, que nous savons imparfaite, pour le scénario S2 : dans ce scénario, les produits concernés par des clauses miroirs ou de réciprocité sont les produits végétaux destinés à l'alimentation humaine, y compris l'huile de palme, et les viandes de monogastriques (les deux derniers étant ajoutés au titre de la qualité nutritionnelle).

Dans le scénario 3, les clauses miroirs et de réciprocité sont étendues à l'exigence de durabilité des systèmes alimentaires. Dans Globagri-AE2050, nous avons considéré que les restrictions commerciales correspondantes ajoutaient à la liste précédente des produits concernés par des restrictions, les produits de l'élevage de ruminants, les œufs, et les tourteaux protéiques, en tant qu'aliments pour animaux qui sont caractéristiques de la production animale intensive.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'ampleur des restrictions appliquées dans les scénarios S2 et S3 dépend de la capacité des pays étrangers à se conformer aux règles européennes et de leur volonté de signer des accords commerciaux bilatéraux avec l'Europe. Comme nous ne disposons pas d'informations à ce sujet, nous avons calibré les baisses des coefficients commerciaux du modèle sur la base des parts des importations extracommunautaires.

2. Les résultats de simulation

Quatre scénarios ont été simulés avec GlobAgri-AE2050 : le scénario de référence (Réf.) et les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides S1, S2, S3. Comme nous l'avons déjà mentionné, le scénario de référence est largement inspiré du scénario

« Régimes alimentaires tendanciels x Rendements faibles » de l'étude AE2050 (Tibi *et al.*, 2020). Seules les hypothèses d'évolution des régimes alimentaires, pour les huit sous-régions européennes seulement, et des intensités culturales, partout dans le monde, ont été ajustées pour cette prospective. Les scénarios S1, S2 et S3 intègrent quant à eux les hypothèses décrites précédemment pour les huit sous-régions européennes. Dans ces scénarios, les évolutions dans le reste du monde sont inchangées par rapport au scénario de référence.

Pour l'analyse des résultats de simulation, nous comparons le niveau des variables de sortie en 2050 relativement à leur niveau dans la situation initiale. Pour chaque scénario S1, S2 et S3, l'écart total combine les effets de l'évolution tendancielle telle que projetée dans le scénario de référence et les effets spécifiques de la transition de l'Europe vers une agriculture sans pesticides telle qu'imaginée dans le scénario. Ces effets spécifiques peuvent être isolés en comparant le niveau des variables de sortie en 2050 dans le scénario considéré, à leur niveau en 2050 dans le scénario de référence.

Les variables de sortie du modèle sont les superficies cultivées (arables et en cultures permanentes) et les surfaces en prairies permanentes, les quantités produites et échangées et les émissions de GES, d'origine agricole et induites par le changement d'usage des terres, pour l'ensemble des pays et régions géographiques du modèle (y compris les huit sous-régions européennes). Certaines de ces variables sont en outre disponibles par produit (superficies cultivées, production et échanges). Pour rester synthétique, nous présentons les résultats de simulation pour l'Europe (regroupement des huit sous-régions européennes) et pour le reste du monde (regroupement de toutes les régions non européennes) et, pour la production et les échanges, en termes de kilocalories (regroupement de tous les produits). Une analyse des résultats pour les huit sous-régions européennes est disponible dans Mora *et al.* (2023).

Nous présentons d'abord les résultats qui concernent les surfaces, puis ceux de production et d'échanges et enfin les résultats relatifs aux émissions de GES. Dans les trois cas, pour les scénarios S1, S2 et S3, ce sont les résultats avec l'alternative rendements bas en Europe (rb) qui sont analysés. Les résultats obtenus avec l'alternative rendements hauts en Europe (rh) sont ensuite examinés rapidement afin d'appréhender la sensibilité des résultats de simulation à l'hypothèse d'évolution des rendements des cultures.

■ Impacts des scénarios sur les surfaces

Par définition, le modèle intègre une contrainte de surface maximale cultivable par région géographique. La surface maximale cultivable régionale est fixée par hypothèse. Dans cette prospective, nous avons supposé que pour les huit sous-régions européennes (et donc pour l'Europe dans son ensemble), la surface maximale cultivable est :

- maintenue constante au niveau de la superficie cultivée de la situation initiale 2010 dans le scénario de référence et les scénarios S1 et S2,

- fixée au niveau de la superficie cultivée initiale de 2010 amputée de la surface nécessaire pour atteindre l'objectif de 20 % de HSN dans le scénario S3.

La surface en prairies permanentes s'ajuste, quant à elle, librement.

Superficies cultivées

Le scénario de référence conduit à une expansion de la superficie cultivée mondiale de +196 millions d'hectares entre 2010 et 2050. Ceci indique que, sous nos hypothèses, le besoin supplémentaire en surface cultivée, tiré par l'occidentalisation des régimes alimentaires de par le monde et la croissance de la population mondiale, est supérieur à la réduction du besoin en surface cultivée, permise par la croissance des rendements des cultures et de la productivité des élevages (tableau 5.5).

L'expansion de la superficie cultivée mondiale est légèrement supérieure avec le scénario S1 (+221 Mha). L'effet en cause ici est la réduction des rendements des cultures en Europe. En effet, avec l'alternative rendements bas, les rendements européens en 2050 sont inférieurs avec les trois scénarios S1, S2, S3 relativement au scénario de référence. La superficie cultivée en Europe étant inchangée, la production domestique décroît. Dans le scénario S1, le régime alimentaire européen est le même que dans le scénario de référence. Il en résulte que la diminution de la production domestique se traduit par une réduction des exportations européennes. L'agriculture européenne étant parmi les plus productives du monde, il faut plus de surface pour produire dans le reste du monde les quantités nécessaires pour remplacer les exportations européennes.

Le scénario S2 conduit quant à lui à une expansion de superficie cultivée au niveau mondial légèrement inférieure à celle induite par le scénario de référence (+187 Mha). Les rendements des cultures étant les mêmes que dans le scénario S1, c'est l'évolution du régime alimentaire européen qui est à la manœuvre ici. Le régime alimentaire sain du scénario S2 est en effet moins riche en énergie et en produits animaux, ce qui contribue à réduire les besoins domestiques. Cette baisse des besoins domestiques permet un meilleur maintien des exportations européennes d'une part, et une réduction plus forte des importations européennes d'autre part, que dans le scénario S1. Il en résulte des besoins additionnels moindres dans le reste du monde et une expansion plus limitée de la superficie cultivée au niveau mondial.

Les mécanismes sont les mêmes dans le scénario S3, mais leur ampleur est accentuée par rapport au scénario S2, car le régime alimentaire européen y est significativement moins riche en énergie et en produits animaux, tandis que les restrictions aux importations y sont renforcées. La réduction de la superficie cultivée en Europe ne parvient néanmoins pas à inverser la tendance au niveau mondial. Cependant, au total, le scénario S3 conduit à l'expansion de la superficie cultivée mondiale la plus faible (+161 Mha).

Tableau 5.5. Variation de la superficie cultivée entre 2010 et 2050 avec les quatre scénarios en Europe et pour le monde dans son ensemble (en milliers d'hectares)

	Réf.	S1_rb	S2_rb	S3_rb
Europe	0	0	0	-3 472 (-3 %)
Total monde	+196 072 (+13 %)	+221 176 (+14 %)	+187 022 (+12 %)	+161 332 (+10 %)

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ;
S3 : scénario 3 ; rb : rendements bas.
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Surfaces en prairies permanentes

Le scénario de référence conduit à une expansion de la surface mondiale en prairies permanentes de +636 Mha. Cette augmentation très significative (+33 %) se produit principalement dans le reste du monde (+633 Mha), l'expansion en Europe restant limitée, à environ +2 Mha (tableau 5.6). Les mécanismes à l'œuvre sont exactement les mêmes que ceux décrits plus haut pour les superficies cultivées (c'est-à-dire, occidentalisation des régimes alimentaires et croissance de la population ; ces deux facteurs étant très marqués dans le reste du monde et pratiquement atones en Europe).

Les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides impliquent une réduction significative de la surface en prairies permanentes en Europe (-13 Mha avec S1, -20 Mha avec S2 et -36 Mha avec S3). Plusieurs facteurs contribuent à cette réduction qui est le reflet de la contraction de l'élevage domestique. Prenons le cas du scénario S3 qui entraîne une réduction de moitié de la surface européenne initiale en prairies permanentes. Le régime alimentaire européen dans ce scénario est clairement moins riche en produits animaux, ce qui contribue à réduire le besoin et, par suite, la production animale domestique. Ce premier effet est renforcé par les restrictions aux importations européennes en vigueur dans ce scénario. Ces dernières forcent l'Europe à accroître les quantités disponibles en interne pour compenser les quantités qui étaient préalablement importées. Les quantités disponibles en interne peuvent être accrues en augmentant la production domestique ou en réduisant les exportations. Or, l'accroissement de la production domestique est rendu difficile pour les produits végétaux (dont ceux destinés à l'alimentation animale), car la surface cultivée européenne ne peut s'étendre tandis que les rendements des cultures augmentent peu, voire diminuent par rapport à 2010. L'ajustement passe donc plutôt par la réduction des exportations et cet effet est plus marqué pour les produits animaux que pour les produits végétaux. Ce sont les mêmes mécanismes qui jouent dans le scénario S2, mais leur ampleur est réduite, car le régime alimentaire européen est plus riche en produits animaux tandis que les restrictions aux importations sont moindres que dans S3. Dans le scénario S1, le régime alimentaire est le même et il n'y a pas plus de restrictions aux importations que dans le scénario de référence. Pourtant, la surface européenne en prairies permanentes diminue de -13 Mha dans le scénario S1

alors qu'elle augmente de +2 Mha dans le scénario de référence. Cet écart entre les deux scénarios résulte du seul effet rendement. La production domestique végétale se contracte en Europe dans S₁ et entraîne à sa suite la production domestique animale. Les besoins domestiques restant élevés, les exportations européennes diminuent fortement, contribuant à réduire la surface en prairies permanentes.

L'évolution de la surface en prairies permanentes dans le reste du monde résulte uniquement des ajustements des importations et des exportations européennes. Par rapport au scénario de référence, S₁ est le scénario qui induit la plus forte réduction des exportations et la plus faible variation des importations européennes. Ces deux effets jouent dans le sens d'un renforcement de la production dans le reste du monde et, par suite du besoin en surface de prairies permanentes. C'est dans ce scénario en effet que cette surface s'étend le plus largement dans le reste du monde (+676 Mha). L'augmentation plus forte que dans le scénario de référence résulte du fait que l'élevage européen est, en moyenne, plus productif que l'élevage dans le reste du monde, si bien que le remplacement des exportations européennes de produits animaux par de la production domestique dans le reste du monde nécessite de plus grandes surfaces de prairies permanentes. Au contraire, S₃ est le scénario qui implique la moins forte réduction des exportations et la plus forte réduction des importations européennes. C'est aussi le scénario qui conduit à la plus faible expansion de la surface en prairies permanentes dans le reste du monde (+588 Mha). Le scénario S₂ représente une situation intermédiaire en ce qui concerne l'ajustement des exportations et des importations européennes. L'accroissement de la surface en prairies permanentes induite dans le reste du monde est également intermédiaire entre S₁ et S₃ (+639 Mha).

Tableau 5.6. Variation de la surface en prairies permanentes entre 2010 et 2050 avec les quatre scénarios en Europe, dans le reste du monde et pour le monde dans son ensemble (en milliers d'hectares)

	Réf.	S ₁ _rb	S ₂ _rb	S ₃ _rb
Europe	+2 214 (+3 %)	-12 748 (-18 %)	-20 285 (-28 %)	-36 382 (-51 %)
Reste du monde	+633 755 (+34 %)	+675 889 (+36 %)	+639 263 (+34 %)	+588 491 (+32 %)
Total monde	+635 979 (+33 %)	+663 140 (+34 %)	+ 618 978 (+32 %)	+552 108 (+29 %)

Réf. : référence ; S₁ : scénario 1 ; S₂ : scénario 2 ;
S₃ : scénario 3 ; rb : rendements bas.
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Résultats avec l'alternative rendements hauts (rh)

Dans le tableau 5.7, on compare l'impact des scénarios S₁, S₂ et S₃ sur les surfaces, lorsque les trois scénarios sont simulés avec l'alternative rendements bas (rb) et rendements hauts (rh). Que ce soit pour la superficie cultivée ou pour la surface en prairies

permanentes, les résultats dans le reste du monde sont peu sensibles à l'hypothèse retenue pour l'évolution des rendements européens : de manière logique lorsque les rendements européens sont plus élevés, le reste du monde a moins besoin d'augmenter sa production domestique pour remplacer les exportations européennes manquantes, si bien que l'expansion des surfaces en dehors de l'Europe est légèrement moindre. Les résultats pour l'Europe sont un peu plus sensibles pour la surface en prairies permanentes, notamment avec les deux premiers scénarios S1 et S2. C'est la contrainte sur la superficie cultivée en Europe qui joue ici : cette contrainte détermine les possibilités d'évolution de l'élevage européen ; lorsqu'elle se desserre, comme ici entre rb et rh, l'élevage européen est plus « libre » d'ajuster sa production aux besoins des marchés européens et mondiaux de produits animaux ; la surface européenne en prairies permanentes suit l'évolution de l'élevage domestique.

Tableau 5.7. Variation de la superficie cultivée et de la surface en prairies permanentes entre 2010 et 2050 avec les trois scénarios, sous l'hypothèse alternative rb et rh, en Europe, dans le reste du monde et pour le monde dans son ensemble (en millions d'hectares)

	S1		S2		S3	
	rb	rh	rb	rh	rb	rh
Variation de la superficie cultivée						
Europe	0	0	0	0	-3,5	-5,6
Monde	221	199	187	162	161	143
Variation de la surface en prairies permanentes						
Europe	-12,7	+1,5	-20,3	-9,3	-36,4	-32,9
Reste du monde	+676	+654	+639	625	+588	+575
Total monde	+663	+652	+619	+616	+552	+542

Les valeurs sont exprimées en million d'hectares (Mha).
 Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ;
 rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.
 Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

■ Impacts des scénarios sur la production et les échanges européens

Avec l'alternative rendements bas (rb)

La figure 5.3 propose une représentation du bilan utilisations-ressources en kilocalories (plus exactement 10^{12} kcal) pour l'Europe, dans la situation initiale 2010 et en 2050 à l'issue des quatre scénarios. Plus précisément, la figure 5.3 se lit comme suit : dans la situation initiale 2010, l'Europe utilise $1\,884 \cdot 10^{12}$ kcal (719 pour l'alimentation

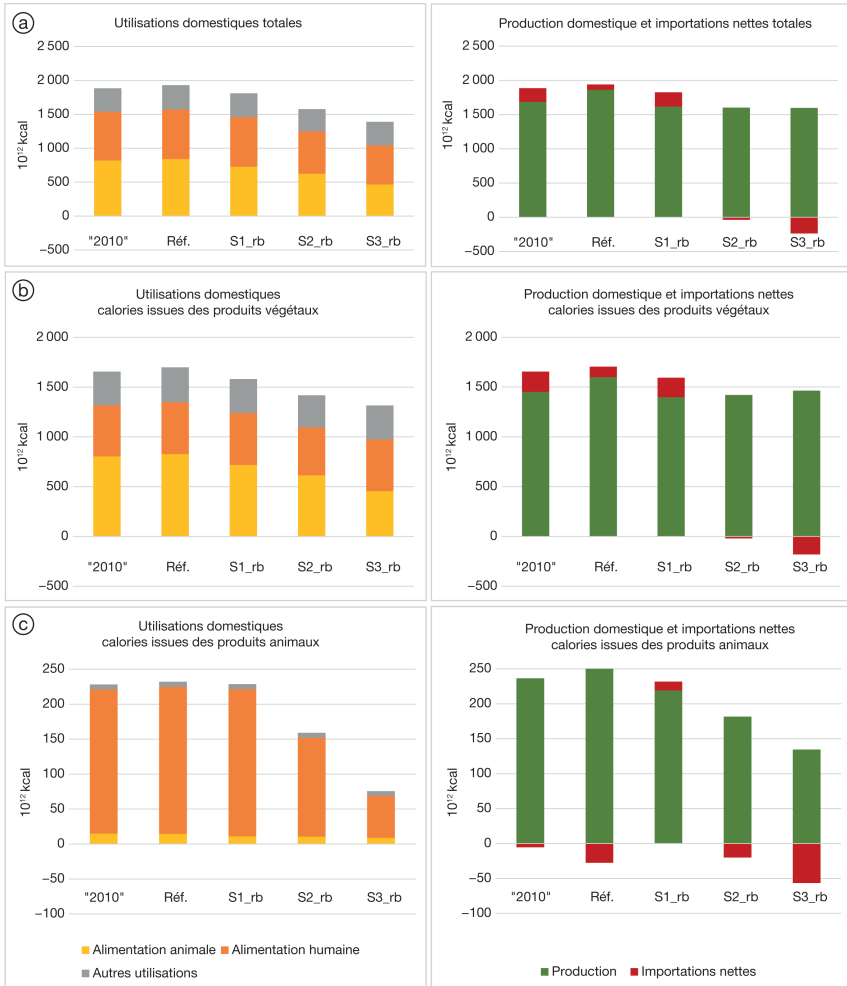
humaine, 820 pour l'alimentation animale et 345 pour les autres utilisations ; panneau de gauche, figure 5.3.a). Ces besoins en kilocalories sont couverts par de la production domestique, à hauteur de $1\,687.10^{12}$ kcal et par des importations nettes pour 199.10^{12} kcal (panneau de droite, figure 5.3.a). Les importations nettes totales se composent d'une quantité positive ($+204.10^{12}$ kcal) pour les produits végétaux (l'Europe est un importateur net, figure 5.3.b) et d'une faible quantité négative (-5.10^{12} kcal) pour les produits animaux (l'Europe est un exportateur net, figure 5.3.c). La figure 5.3 montre ensuite comment l'équilibre européen se déforme lorsque l'on passe de la situation initiale 2010 à la situation finale 2050 avec le scénario de référence, puis avec les trois scénarios S1, S2 et S3.

En ce qui concerne le scénario de référence, l'utilisation domestique totale augmente par rapport à la situation initiale 2010. L'augmentation provient principalement de l'utilisation pour l'alimentation animale. Les besoins supplémentaires sont couverts par l'augmentation de la production intérieure. Les importations nettes, quant à elles, diminuent. Les importations représentant une part fixe de l'utilisation intérieure, le scénario de référence fait augmenter les importations européennes, ce qui signifie que les exportations augmentent plus que les importations. Ces exportations sont en effet tirées par l'accroissement des besoins dans le reste du monde. Les panneaux b et c de la figure 5.3 suggèrent qu'en proportion, les exportations de produits animaux augmentent plus que les exportations de produits végétaux.

Lorsque l'on passe du scénario de référence au scénario S1, les rendements à l'hectare, plus bas dans S1, empêchent l'augmentation de la production domestique, ce qui se traduit par une contraction des exportations européennes, la réduction pour les produits animaux étant proportionnellement plus forte que celle pour les produits végétaux (figure 5.3, panneaux b et c). Il en résulte une diminution de l'utilisation domestique pour l'alimentation animale et, au total, une diminution de l'utilisation totale en Europe (figure 5.3, panneau a).

L'impact de la modification des régimes alimentaires européens dans les scénarios S2 et S3 sur l'utilisation intérieure totale apparaît très clairement dans la figure 5.3, panneau de gauche. Les régimes alimentaires de S2 et S3 étant moins riches en énergie et en produits animaux, l'utilisation intérieure totale décroît, l'utilisation pour l'alimentation animale diminuant plus, en proportion, que l'utilisation pour l'alimentation humaine. Les importations européennes, proportion fixe de l'utilisation intérieure, décroissent également. Cet ajustement à la baisse est renforcé par les restrictions sur les importations mises en œuvre dans les scénarios S2 et S3. La production domestique étant pratiquement stable dans les scénarios S1, S2 et S3, l'Europe devient autosuffisante dans S2 (les importations nettes sont quasiment réduites à zéro et la production intérieure est égale à la consommation intérieure totale) et exportatrice nette dans S3 (les importations nettes deviennent négatives, c'est-à-dire que les exportations deviennent supérieures aux importations, ce qui est rendu possible par une production domestique qui dépasse les besoins intérieurs).

Figure 5.3. Bilan utilisations-ressources de l'Europe en 2010 et en 2050 dans le scénario de référence (Réf.) et les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides (S1, S2 et S3, rb)



Le panneau a indique l'énergie totale en billions de kilocalories (10¹² kcal).
 Le panneau b indique l'énergie issue de produits végétaux en billions de kilocalories (10¹² kcal).
 Le panneau c indique l'énergie issue de produits animaux en billions de kilocalories (10¹² kcal).

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ;
 rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.

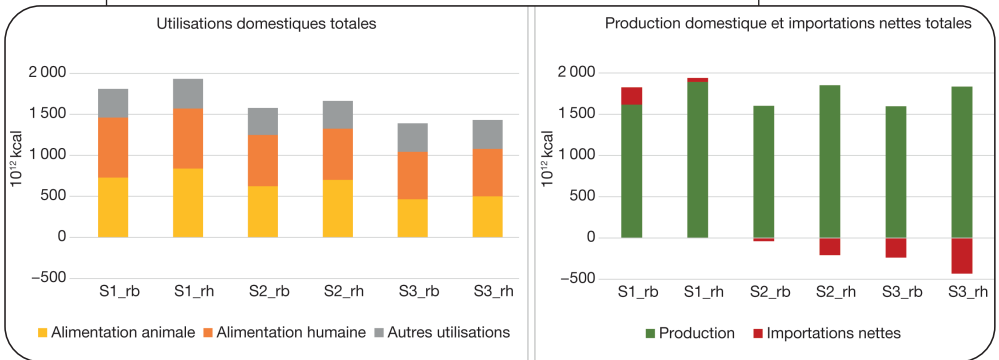
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Comme le montre la figure 5.3.c, la différence principale entre les scénarios S2 et S3 réside dans l'utilisation domestique pour l'alimentation humaine des produits animaux : elle diminue de moitié entre le scénario S2 et le scénario S3. Ceci se traduit par une diminution significative de l'utilisation domestique pour l'alimentation animale de produits végétaux : elle diminue d'un tiers environ entre S2 et S3. La production domestique étant stable dans les deux scénarios, l'Europe est en mesure d'augmenter beaucoup plus ses exportations, en particulier de produits animaux, dans le scénario S3 que dans le scénario S2 (figure 5.3, panneau c).

Avec l'alternative rendements hauts (rh)

Lorsque l'on passe de l'hypothèse des rendements bas à l'hypothèse des rendements hauts, l'Europe est en capacité de produire plus et d'accroître ses exportations, en particulier de produits animaux (figure 5.4). L'ajustement à la hausse de la production domestique de produits animaux entraîne une augmentation des utilisations domestiques pour l'alimentation animale. Au total, les importations nettes diminuent plus avec l'alternative rendements hauts qu'avec l'alternative rendements bas. Dans les scénarios S2 et S3, les importations nettes deviennent même négatives, indiquant que l'Europe devient exportatrice nette. La position d'exportatrice nette est plus marquée avec les rendements hauts relativement aux rendements bas et dans le scénario S3 par rapport au scénario S2.

Figure 5.4. Bilan utilisations-ressources de l'Europe en 2010 et en 2050 dans les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides (S1, S2 et S3, rb et rh)



Les graphiques indiquent l'énergie totale en milliards de kilocalories (10¹² kcal).
 Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ;
 rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.
 Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

■ Impacts des scénarios sur les émissions de gaz à effet de serre

Nous considérons d'abord les émissions de GES d'origine agricole. Ces dernières sont classées en différentes catégories et calculées en équivalent CO₂ : épandage d'engrais minéraux et organiques, émissions de méthane des rizières, brûlage des résidus agricoles, résidus de culture, du côté des végétaux et fermentation entérique et gestion des déjections animales, du côté des animaux.

Nous examinons ensuite les émissions de GES induites par les changements d'usage des terres. Dans chaque pays et région considérée, la surface agricole est la somme de la superficie cultivée et de la surface en prairies permanentes. Pour calculer les variations d'émissions de CO₂ liées au changement d'usage des terres, nous posons les hypothèses suivantes :

- Lorsque la superficie cultivée doit s'étendre, elle s'étend d'abord sur les prairies permanentes.
- Lorsque la surface en prairies permanentes doit s'étendre, elle s'étend d'abord sur la surface en broussailles, taillis, petits arbustes, puis, si nécessaire, sur la surface en forêt.
- Nous utilisons les coefficients de stocks de carbone dans les sols et dans la biomasse aérienne de la directive de la Commission européenne de 2010 (EC, 2010). Ces coefficients varient par zone climatique selon le type de sol et l'usage des terres.
- Les émissions de CO₂ cumulées sont égales à la différence entre le stock de carbone final et le stock de carbone initial (lorsqu'il n'y a pas de changement d'usage des terres, le stock de carbone est inchangé et il n'y a pas d'émission).
- Ces émissions cumulées sont par hypothèse amorties sur 40 ans et les émissions annuelles sont obtenues en divisant les émissions cumulées par 40.

Émissions d'origine agricole

Le scénario de référence conduit à une augmentation de +32 % des émissions mondiales de GES d'origine agricole entre la situation initiale 2010 et 2050. En Europe, l'augmentation n'est « que » de +10 %, principalement en raison de notre hypothèse de maintien de la superficie cultivée, qui limite l'augmentation de la production intérieure (tableau 5.8).

Les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides conduisent quant à eux à une diminution des émissions de GES agricoles en Europe (-8 % dans le scénario S₁, -20 % dans le scénario S₂ et -37 % dans le scénario S₃). Quel que soit le scénario, la baisse provient pour une plus grande part des émissions de la production animale (tableau 5.8). Dans le scénario S₁, la diminution en Europe est surcompensée par une augmentation dans le reste du monde non européen, ce qui entraîne une augmentation des émissions agricoles totales au niveau mondial par rapport au scénario de référence (+36 % contre +32 % dans le scénario de référence). Cela signifie qu'avec le scénario S₁, il y a une certaine fuite d'émissions de l'Europe vers d'autres régions du monde. Ce n'est pas le cas des scénarios S₂ et S₃, dans lesquels la diminution des émissions européennes n'est

pas totalement compensée par l'augmentation dans le reste du monde. Il en résulte que dans ces deux scénarios, les émissions mondiales de GES d'origine agricole augmentent moins que dans le scénario de référence (+31 % et +26 % avec S2 et S3 respectivement, contre +32 % dans le scénario de référence). Dans les scénarios S2 et S3, les restrictions aux importations européennes contribuent à limiter les fuites d'émissions.

Tableau 5.8. Variation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole entre 2010 et 2050 dans le scénario de référence (Réf.) et dans les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides (S1, S2 et S3, rb) en Europe, dans le reste du monde et pour le monde dans son ensemble (en pourcentage)

Variation entre 2010 et 2050	Réf.			S1_rb			S2_rb			S3_rb		
	Tot.	Vég. ¹	Ani. ²	Tot.	Vég. ¹	Ani. ²	Tot.	Vég. ¹	Ani. ²	Tot.	Vég. ¹	Ani. ²
Europe	+10	+11	+9	-8	-3	-10	-20	-7	-24	-37	-9	-48
Reste du monde	+34	+29	+37	+36	+29	+39	+35	+28	+39	+32	+27	+34
Monde	+32	+27	+35	+36	+27	+35	+31	+26	+33	+26	+24	+27

1. Épandage d'engrais minéraux et organiques, émissions de méthane des rizières, brûlage des résidus agricoles, résidus de culture (en équivalent CO₂).

2. Fermentation entérique et gestion des déjections animales (en équivalent CO₂).

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ;

rb : rendements bas ; Tot. : total ; Vég. : végétal ; Ani. : animal.

Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Émissions induites par le changement d'usage des terres

Étant données nos hypothèses de calcul des émissions de GES induites par le changement d'usage des terres, ces émissions atteindraient annuellement 3 129 millions de tonnes d'équivalents CO₂ (Mt CO₂eq) dans le monde, avec le scénario de référence (tableau 5.9). Ces émissions nettes positives significatives résultent de l'expansion de +832 millions d'hectares de terre agricole entre 2010 et 2050, dont +196 millions d'hectares de prairies permanentes converties en terres cultivées et +636 millions d'hectares de prairies permanentes prises principalement sur des terres en broussailles, taillis et arbustes et, dans une bien moindre mesure, sur des surfaces forestières. Au contraire, en Europe, le scénario de référence entraîne une séquestration nette de carbone et les émissions annuelles sont négatives (-6 Mt CO₂eq).

Les trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides contribuent à accroître la séquestration nette de carbone dans les sols et la biomasse aérienne en Europe : les émissions annuelles sont négatives et supérieures, en valeur absolue, à celles obtenues avec le scénario de référence : -9 Mt CO₂eq avec S1, -17 Mt avec S2 et -43 Mt avec S3 (tableau 5.9). Dans le scénario S1, l'accroissement des émissions négatives européennes est plus que compensé par l'augmentation des émissions positives

dans le reste du monde, si bien qu'au niveau mondial les émissions annuelles de GES induites par le changement d'usage des terres sont plus élevées que dans le scénario de référence (3 334 Mt CO₂eq contre 3 129 Mt dans le scénario de référence). Ce n'est pas le cas avec les scénarios S2 et S3 pour lesquels les émissions mondiales annuelles restent inférieures à leur niveau dans le scénario de référence.

Tableau 5.9. Émissions de gaz à effet de serre cumulées et annuelles induites par le changement d'usage des terres en 2050 avec les quatre scénarios (Réf., S1, S2 et S3, rb), en Europe et pour le monde dans son ensemble (en millions de tonnes d'équivalent CO₂)

	Réf.	S1_rb	S2_rb	S3_rb
Monde				
Émissions cumulées	125 164	133 348	124 523	112 054
Émissions annuelles (amorties sur 40 ans)	3 129	3 334	3 113	2 801
Europe				
Émissions cumulées	-227	-351	-690	-1 731
Émissions annuelles (amorties sur 40 ans)	-6	-9	-17	-43

Réf. : référence ; S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ; rb : rendements bas.
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Résultats avec l'alternative rendements hauts (rh)

L'alternative rendements hauts permet à l'Europe de produire plus, ce qui accroît ses émissions de GES d'origine agricole par rapport à l'alternative rendements bas. Ainsi dans les trois scénarios S1, S2 et S3, les réductions d'émissions de GES obtenues avec l'alternative rendements hauts sont moindres que celles obtenues avec l'alternative rendements bas. Dans le scénario S1, l'alternative rendements hauts entraîne même une augmentation des émissions de GES agricoles de +9 %, alors que l'alternative rendements bas contribuait à les réduire de -8 % (tableau 5.10).

Au niveau mondial en revanche, l'alternative rendements hauts contribue à réduire l'augmentation des émissions agricoles. Ceci indique que la production européenne émet moins de GES par kilocalorie produite que la production dans le reste du monde. Ainsi, le supplément de production en Europe, permis par l'alternative rendements hauts relativement à rendements bas, réduit l'augmentation de la production dans le reste du monde. Au total, le monde émet moins de GES agricoles en 2050 avec l'alternative rendements hauts, quel que soit le scénario.

Tableau 5.10. Variation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole entre 2010 et 2050 dans les scénarios S1, S2 et S3 avec l'alternative rb et rh en Europe et pour le monde dans son ensemble (en pourcentage)

	S1_rb	S1_rh	S2_rb	S2_rh	S3_rb	S3_rh
Europe	-8	+9	-20	-6	-37	-32
Monde	+36	+35	+35	+33	+32	+31

S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ; rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

Dans les scénarios S1 et S2, l'alternative rendements hauts réduit la séquestration nette de carbone dans les sols et la biomasse aérienne en Europe, relativement à l'alternative rendements bas (tableau 5.11). Au contraire, dans le scénario S3, l'alternative rendements hauts conduit à accroître cette séquestration nette. Ceci est principalement dû à la réduction de la superficie cultivée, plus marquée avec l'alternative rendements hauts (-5,6 Mha contre -3,5 Mha), au profit de HSN (y compris prairies permanentes) plus stockeurs de carbone.

Au niveau mondial, les trois scénarios induisent des émissions liées au changement d'usage des terres plus faibles avec l'alternative rendements hauts (tableau 5.11). Comme nous l'avons déjà noté, l'Europe est plus efficace que le reste du monde en ce qui concerne l'utilisation des terres pour la production agricole. Comme l'Europe produit plus avec l'alternative rendements hauts, le monde dans son ensemble utilise moins de surface agricole, ce qui contribue à réduire les émissions de GES liées.

Tableau 5.11. Émissions de gaz à effet de serre cumulées et annuelles induites par le changement d'usage des terres en 2050 dans les scénarios S1, S2 et S3, avec l'alternative rb et rh, en Europe et pour le monde dans son ensemble (en millions de tonnes d'équivalents CO₂)

	S1_rb	S1_rh	S2_rb	S2_rh	S3_rb	S3_rh
Monde						
Émissions cumulées	133 348	127 002	124 523	117 778	112 054	109 447
Émissions annuelles (amorties sur 40 ans)	3 334	3 175	3 113	2 944	2 801	2 736
Europe						
Émissions cumulées	-351	-195	-690	-583	-1 731	-1 965
Émissions annuelles (amorties sur 40 ans)	-9	-5	-17	-15	-43	-49

S1 : scénario 1 ; S2 : scénario 2 ; S3 : scénario 3 ; rb : rendements bas ; rh : rendements hauts.
Source : résultats de simulation de GlobAgri-AE2050.

3. Les principaux enseignements

Le tableau 5.12 rapporte une série d'indicateurs permettant de décrire le système agricole et alimentaire européen dans la situation initiale 2010, et en 2050 à l'issue du scénario de référence et des trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides, avec l'alternative rendements bas (5.12.a), puis rendements hauts (5.12.b). À partir de ce tableau, nous proposons une comparaison des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides et en tirons les principaux enseignements.

■ Les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides sont-ils compatibles avec la souveraineté alimentaire de l'Europe ?

Dans la situation initiale 2010 (moyenne 2009-2011), un européen consomme en moyenne 3 400 kcal par jour (y compris les gaspillages au niveau de la distribution et de la consommation), dont 25 % proviennent de produits animaux. Chaque hectare de terre cultivée produit en moyenne 14,8 millions de kilocalories par an. La production domestique totale s'élève à $1\,700 \cdot 10^{12}$ kcal par an. La production domestique totale est utilisée pour couvrir, à la fois, les besoins intérieurs (alimentation humaine et animale et autres utilisations) et les besoins extérieurs (par le biais des exportations). En ce qui concerne les besoins intérieurs, l'Europe consacre plus de calories à l'alimentation animale ($820 \cdot 10^{12}$ kcal) qu'à l'alimentation humaine ($720 \cdot 10^{12}$ kcal). En ce qui concerne les échanges avec l'extérieur, l'Europe est importatrice nette de calories : en moyenne, elle importe $200 \cdot 10^{12}$ kcal de plus qu'elle n'en exporte par an. Les émissions de GES de l'agriculture européenne s'élèvent à 426 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an.

Sous l'hypothèse que les tendances actuelles se maintiennent (scénario de référence), en 2050, un européen consomme en moyenne 3 500 kcal par jour, dont 26 % proviennent de produits animaux. Chaque hectare de terre cultivée produit en moyenne 17,3 millions de kilocalories par an, grâce à une légère augmentation des rendements moyens des cultures en Europe. La production domestique atteint $1\,862 \cdot 10^{12}$ kilocalories par an (+10 % par rapport à 2010). Les besoins domestiques augmentent faiblement (+3 % par rapport à 2010) et la quantité de calories utilisées en alimentation animale ($842 \cdot 10^{12}$ kcal) reste supérieure à celle consacrées à l'alimentation humaine ($731 \cdot 10^{12}$ kcal). Sur les marchés extérieurs, l'Europe profite de la forte demande étrangère et augmente ses exportations. Il en résulte une diminution notable des importations nettes, mais l'Europe reste importatrice nette de calories : elle importe en moyenne $80 \cdot 10^{12}$ kcal de plus qu'elle n'en exporte par an. Les émissions de GES de l'agriculture européenne s'élèvent à 468 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an, soit 10 % de plus qu'en 2010. Les changements d'usage des terres contribuent à augmenter le stockage de carbone dans les sols et la biomasse aérienne en Europe : les émissions liées au changement d'usage des terres sont négatives et atteignent -6 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an. Ainsi, en 2050, sous l'hypothèse que

les stocks de carbone des terres qui restent non agricoles soient inchangées, les émissions nettes du secteur de l'agriculture, de la foresterie et des autres utilisations des terres (AFAT ou AFOLU en anglais) augmentent en Europe par rapport à 2010.

La transition vers une agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050 pourrait avoir des effets contrastés sur le volume de la production agricole européenne, selon les scénarios et selon l'hypothèse retenue pour l'évolution des rendements des cultures (rendements bas ou rendements hauts). Avec l'hypothèse des rendements bas, la production domestique européenne en kilocalories est réduite de -4% à -5% par rapport à 2010 dans les trois scénarios. Avec l'hypothèse des rendements hauts, le volume de production de l'agriculture européenne en kilocalories augmente de $+9\%$ ou $+10\%$ (scénarios S3 et S2, respectivement) à 12% (scénario S1) entre 2010 et 2050.

Le volume total de production de l'agriculture européenne varie relativement peu d'un scénario à l'autre, mais sa composition diffère significativement entre les scénarios, car l'agriculture européenne est intégrée dans des systèmes agricoles et alimentaires complètement différents dans les trois scénarios. Étant donné le fonctionnement de GlobAgri-AE2025, la composition de la production européenne imite largement la composition du régime alimentaire domestique. Ainsi, si la composition de la production européenne en 2050 est peu différente de celle observée dans la situation initiale 2010 dans le scénario S1, elle est radicalement différente dans les scénarios S2 et S3. Dans le scénario S2, par rapport à 2010, l'Europe produit plus de céréales secondaires, de fruits et légumes et de légumineuses et moins de plantes et produits sucriers en 2050. Du côté des produits animaux, la production européenne diminue sensiblement pour tous les types de produits, de même que la production d'ingrédients utilisés en alimentation animale, y compris les fourrages de qualité, et l'utilisation d'herbe des prairies permanentes. Dans le scénario S3, l'Europe produit moins de céréales et plus d'oléagineux (en raison de l'augmentation de la consommation d'aliments à base de soja et des restrictions à l'importation de tous les produits d'oléagineux qui sont en vigueur dans ce scénario) et de légumineuses. La production animale européenne diminue fortement dans ce scénario, tout comme la production de fourrage de qualité et l'utilisation d'herbe provenant des prairies permanentes.

L'évolution des régimes alimentaires domestiques vers des régimes sains (S2) ou vers des régimes sains et plus respectueux de l'environnement (S3) donnerait à l'Europe une certaine marge de manœuvre pour équilibrer les ressources et les utilisations domestiques tout en devenant exportatrice nette de calories. En d'autres termes, les scénarios S2 et S3 seraient susceptibles de conduire à une amélioration de la souveraineté alimentaire de l'Europe. Dans le scénario S2_rb, un européen consomme en moyenne 3 000 kcal par jour en 2050, dont 20 % proviennent de produits animaux. Ce régime plus frugal se traduit par une diminution de -13% de l'utilisation domestique de calories pour l'alimentation humaine, par rapport à 2010. En outre, la réduction de la consommation de produits animaux implique une diminution de -24% de l'utilisation domestique de calories pour l'alimentation animale. Au total, les utilisations

domestiques totales sont inférieures de -16% en 2050 par rapport à 2010. En kilocalories, les quantités utilisées pour l'alimentation humaine et pour l'alimentation animale sont désormais presque équivalentes en 2050, avec environ 620.10^{12} kcal par an. La diminution de -16% des utilisations domestiques totales est à comparer à la diminution de -5% de la production domestique, à laquelle s'ajoutent les restrictions sur les importations. Finalement, l'Europe devient exportatrice nette en 2050 de près de 40.10^{12} kcal par an.

Les ajustements sont similaires dans le scénario $S3_rb$, mais la réduction des utilisations domestiques et les restrictions sur les importations sont nettement plus marquées dans ce scénario. Dans le scénario $S3_rb$, un européen consomme en moyenne 2 860 kcal par jour, dont seulement 10 % proviennent de produits animaux. Ainsi, les utilisations domestiques totales diminuent de -26% entre 2010 et 2050 dans ce scénario. Ceci permet à l'Europe de devenir exportatrice nette de près de 240.10^{12} kcal par an.

■ Les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides peuvent-ils contribuer au Pacte vert pour l'Europe ?

Les trois scénarios (à l'exception du scénario $S1_rh$) contribuent positivement à la réduction des émissions de GES de l'agriculture européenne et à l'augmentation du stockage du carbone dans les sols et la biomasse aérienne. Sous l'hypothèse des rendements bas, les trois scénarios induisent une diminution des émissions de GES d'origine agricole entre 2050 et 2010 : -8% (-36 millions de tonnes d'équivalent CO_2) avec le scénario $S1_rb$, -20% (-85 millions de tonnes d'équivalent CO_2) avec le scénario $S2_rb$ et -37% (-158 millions de tonnes d'équivalent CO_2) avec le scénario $S3_rb$. Quel que soit le scénario, la diminution provient pour une large part de la réduction des émissions de l'élevage. Avec l'hypothèse des rendements hauts, la diminution des émissions de GES d'origine agricole est plus faible dans les trois scénarios. Avec le scénario $S1_rh$, l'Europe augmente même ses émissions par rapport à 2010 ($+9\%$). Les scénarios $S2_rh$ et $S3_rh$ conduisent quant à eux à de moindres réductions : -6% et -32% respectivement. De plus, par rapport à 2010, les trois scénarios induisent des émissions négatives de GES liées au changement d'usage des terres en Europe. Le scénario $S1_rb$ entraîne une réduction de -9 millions de tonnes d'équivalent CO_2 par an, le scénario $S2_rb$ de -17 millions de tonnes et le scénario $S3_rb$ de -43 millions de tonnes.

Le scénario $S3$, et même le scénario $S2$ sous certaines conditions, pourraient permettre au secteur européen agriculture, forêt et autres utilisations des terres (AFAT) d'atteindre la neutralité carbone en 2050. En effet, partons de la situation initiale 2010, le secteur agricole européen émet annuellement 426 Mt d'équivalent CO_2 tandis que le secteur de l'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF ou LULUCF en anglais) stocke annuellement -309 Mt d'équivalent CO_2 (tableau ES.5¹⁷ de EEA, 2022).

17. La numérotation est celle de l'article cité.

Le secteur AFAT (ou AFOLU en anglais) est donc émetteur net de 117 Mt d'équivalent CO₂ annuellement. Toutes choses étant égales par ailleurs, une réduction nette de la même quantité permettrait alors à ce secteur d'atteindre la neutralité carbone. Depuis 2010 néanmoins, le secteur UTCF a considérablement réduit son stockage de carbone, alors que les émissions du secteur agricole ont stagné (selon EEA [2022], le secteur UTCF ne stocke plus que -217 Mt d'équivalent CO₂ par an en 2020). Toutes choses étant égales par ailleurs jusqu'en 2050, la neutralité carbone du secteur AFAT ne pourrait être atteinte qu'au prix d'une réduction des émissions d'au moins 209 Mt d'équivalent CO₂. Si on ne tient compte que du stockage supplémentaire de carbone dans les sols et la biomasse aérienne induit par nos scénarios, les émissions nettes du secteur AFAT diminueraient de -45 Mt d'équivalent CO₂ par an par rapport à 2010 avec le scénario S1_rb, de -102 Mt par an avec le scénario S2_rb et de -201 Mt par an avec le scénario S3_rb. Ainsi, le scénario S3_rb permettrait presque au secteur AFAT européen d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Si on fait l'hypothèse que les prairies permanentes libérées ne sont plus remplacées par des broussailles, taillis et arbustes mais reboisées, alors la réduction nette des émissions pourrait atteindre (avec les valeurs maximales de stock de carbone pour la biomasse forestière) -116 Mt d'équivalent CO₂ par an avec S1_rb, -231 Mt avec S2_rb et -447 Mt avec S3_rb. Dans ce cas, les scénarios S2 et S3 permettaient au secteur AFAT européen d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Cependant, même dans ce cas le plus favorable, aucun de nos scénarios ne permet au secteur AFAT européen d'atteindre la neutralité carbone en 2035 tel que fixé dans le cadre de l'ajustement à l'objectif 55.¹⁸

18. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0554&qid=1626940138360>

Tableau 5.12. Panorama des hypothèses et des résultats de simulation des scénarios

5.12.a. Avec l'alternative rendements bas (rb)

Moyenne Europe		2010	Référence	S1_rb	S2_rb	S3_rb
Hypothèses	Régime alimentaire (kcal/per/j)	3400	3500	3500	3000	2860
	Part des calories d'origine animale (%)	25 %	26 %	26 %	20 %	10 %
	Rendement ¹ (million kcal/ha)	14,8	17,3	15	15	15
	Surface max cultivable (Mha)	127	127	127	127	123,5
Imports	Pas de restriction	Pas de restriction	Pas de restriction	Restriction pesticides végétaux alimentation humaine et aliments ultratransformés	Restriction pesticides alimentation humaine et ingrédients alimentation animale	
Résultats de simulation	Surface agricole (Mha) (% vs 2010)	199	201 (+1 %)	186 (-6 %)	179 (-10 %)	159 (-20 %)
	Superficie cultivée	127	127	127	127	123,5 (-3 %)
	Surface prairies permanentes	72	74 (+3 %)	59 (-18 %)	52 (-28 %)	36 (-51 %)
	Production (10 ¹² kcal) (% vs 2010)	1687	1862 (+10 %)	1617 (-4 %)	1602 (-5 %)	1597 (-5 %)
	Végétale	1451	1599 (+10 %)	1397 (-4 %)	1420 (-2 %)	1463 (+1 %)
	Animale	236	262 (+11 %)	219 (-7 %)	182 (-23 %)	134 (-43 %)
	Utilisations totales (10 ¹² kcal) (% vs 2010)	1884	1931 (+3 %)	1810 (-4 %)	1578 (-16 %)	1391 (-26 %)
	Alimentation humaine	720	731 (+2 %)	731 (+2 %)	625 (-13 %)	578 (-20 %)
	Alimentation animale	820	842 (+3 %)	730 (-11 %)	622 (-24 %)	465 (-43 %)
	Importations nettes (10 ¹² kcal)	200	78	209	-39	-237
	Pourcentage des utilisations totales	11 %	4 %	12 %	-2 %	-17 %
	Émissions agriculture (Mt CO ₂ eq) (% vs 2010)	426	468 (+10 %)	390 (-8 %)	341 (-20 %)	268 (-37 %)
Émissions changement usage terres (Mt CO ₂ eq/an)	-2	-6	-9	-17	-43	

5.12.b. Avec l'alternative rendements hauts (rh)						
Moyenne Europe		2010	Référence	S1_rh	S2_rh	S3_rh
Hypothèses	Régime alimentaire (kcal/per/l)	3400	3500	3500	3000	2860
	Part des calories d'origine animale (%)	25 %	26 %	26 %	20 %	10 %
	Rendement ¹ (million kcal/ha)	14,8	17,3	16,3	16,7	17
	Surface max. cultivable (Mha)	127	127	127	127	123,5
	Imports	Pas de restriction	Pas de restriction	Pas de restriction	Restriction pesticides végétaux alimentation humaine et aliments ultratransformés	Restriction pesticides alimentation humaine et ingrédients alimentation animale
Résultats de simulation	Surface agricole (Mha) (% vs 2010)	199	201 (+1 %)	201 (+1 %)	190 (-5 %)	161 (-19 %)
	Superficie cultivée	127	127	127	127	121,4 (-4 %)
	Surface prairies permanentes	72	74 (+3 %)	74 (+2 %)	63 (-13 %)	39 (-46 %)
	Production (10¹² kcal) (% vs 2010)	1687	1862 (+10 %)	1891 (+12 %)	1851 (+9 %)	1834 (+9 %)
	Végétale	1451	1599 (+10 %)	1634 (+12 %)	1644 (+13 %)	1689 (+16 %)
	Animale	236	262 (+11 %)	257 (+9 %)	207 (-12 %)	145 (-39 %)
	Utilisations totales (10¹² kcal) (% vs 2010)	1884	1931 (+3 %)	1930 (+3 %)	1663 (-12 %)	1432 (-24 %)
	Alimentation humaine	720	731 (+2 %)	731 (+2 %)	625 (-13 %)	578 (-20 %)
	Alimentation animale	820	842 (+3 %)	840 (+2 %)	701 (-15 %)	500 (-39 %)
	Importations nettes (10¹² kcal)	200	78	48	-208	-431
	Pourcentage des utilisations totales	10 %	4 %	+2 %	-12 %	-30 %
	Émissions agriculture (Mt CO₂eq) (% vs 2010)	426	468 (+10 %)	466 (+9 %)	399 (-6 %)	291 (-32 %)
Émissions changement usage terres (Mt CO₂eq/an)	-2	-6	-5	-15	-49	

1. Le rendement moyen en kcal/ha est calculé en utilisant les rendements par hectare en 2050 de chaque culture, sauf les fourrages de qualité des prairies temporaires, et les parts initiales des surfaces récoltées correspondantes, ceci afin d'éviter l'effet de composition, c'est-à-dire l'effet sur le rendement moyen du changement de composition du panier de production domestique. Le rendement moyen incluant cet effet de composition (utilisant les parts de surface récoltées simulées pour 2050) en kcal/ha est 15 % plus élevé par rapport à 2010 dans le scénario de référence, 2 % plus faible dans le scénario S1_rh, 8 % plus faible dans le scénario S2_rh et 9 % plus faible dans le scénario S3_rh.

2. Selon les inventaires européens des émissions de GES, le secteur UTFC stocke annuellement -309 Mt d'équivalent CO₂ en 2010.

6. Des trajectoires de transition dans quatre régions européennes

Meunier C., Mora O., avec les contributions de Autio S., Butcaru A., Carlesi S., Ciceoi R., Rochambeau H. de, Fintineru G., Jalli M., Lagunovschi V., Laitala E., Lelabousse C., Pecchioni G., Raineau Y.

Les études de cas régionales de la prospective « Agriculture européenne sans pesticides chimiques » visent à élaborer des scénarios et des trajectoires de transition locaux vers une agriculture sans pesticides chimiques en 2050, spécifiques d'un secteur et d'une région donnés. Elles complètent ainsi le travail effectué au niveau européen en déclinant les scénarios européens de transition à des échelles régionales et en élaborant avec les acteurs des trajectoires de transition. Elles sont aussi un moyen de vérifier la pertinence des scénarios et de leurs hypothèses pour construire des trajectoires de transition vers une agriculture sans pesticides chimiques en 2050, dans des contextes locaux spécifiques.

Pour réaliser ces études, nous avons choisi une approche participative, impliquant des experts dans des domaines complémentaires, dans la région et la filière étudiées : ce sont des scientifiques, des agriculteurs, des conseillers agricoles, des représentants d'organisations non gouvernementales, d'industries alimentaires, ou de collectivités territoriales. Cela a permis de tester la manière dont ce travail de prospective peut être mis à profit par les acteurs locaux pour construire leur propre trajectoire de transition vers des systèmes agricoles sans pesticides chimiques, en soulignant les avantages de cette méthode et ses limites.

Pour les acteurs locaux concernés, ces études de cas répondent à trois objectifs principaux. Tout d'abord, elles visent à sensibiliser aux scénarios de production sans pesticides chimiques. Elles suscitent également des débats sur les principaux défis liés à la transition vers de tels systèmes. Enfin, elles génèrent une réflexion collective et fabriquent des réseaux d'acteurs et, potentiellement, en développant une vision commune, elles permettent d'élaborer des stratégies de transformation (Mora *et al.*, 2013 ; van Vliet *et al.*, 2015 ; Hebinck *et al.*, 20218).

Trois questions de recherche ont guidé ces cas d'étude :

- Comment les scénarios européens peuvent-ils être déclinés dans une région et pour une filière ?
- Comment des acteurs locaux peuvent-ils s'emparer de ces scénarios européens pour construire collectivement une trajectoire de transition ?
- Quels jalons, quelles actions et quels acteurs apparaissent comme incontournables pour atteindre ces scénarios ?

1. Vue d'ensemble des régions et des filières étudiées

Les cas d'étude ont été conduits par l'équipe projet d'INRAE DEPE, en collaboration avec des coordinateurs régionaux : Sari Autio de l'Agence de sécurité des produits chimiques Tukes en Finlande ; Stefano Carlesi et Giovanni Pecchioni de l'école supérieure Sant'Anna en Italie ; Gina Fintineru, Viorica Lagunovschi et Ana Butcaru de l'Université des sciences agronomiques et vétérinaires de Bucarest en Roumanie ; et Cécile Lelabousse de l'Interprofession des Vins de Bergerac et Duras en France.

Les coordinateurs régionaux ont choisi la région et la filière étudiées (figure 6.1) :

- la Toscane et la filière blé dur ;
- le sud sud-est de la Roumanie et la filière légumes ;
- le sud de la Finlande et la filière céréales et oléoprotéagineux ;
- le Bergerac Duras et la filière viti-vinicole.

Figure 6.1. Vue d'ensemble des régions et filières étudiées dans les cas d'étude



Tukes : agence de la Sécurité et des Produits chimiques (Finlande) ;
 IVBD : Interprofession des Vins de Bergerac et Duras (France) ; vitiRev :
 programme d'innovation pour des territoires viticoles respectueux de l'environnement
 (Nouvelle-Aquitaine, France) ; USAMV : université des Sciences agronomiques et vétérinaires
 de Bucarest (Roumanie) ; Sant'Anna : école supérieure Sant'Anna de Pise (Italie).

Dans chacun des cas d'étude, une même méthode a été suivie en cinq étapes : d'abord, (i) la sélection d'un des trois scénarios européens pour l'étude de cas régionale ; ensuite, (ii) la « régionalisation » du scénario, qui consiste à traduire le scénario européen choisi en un scénario adapté aux conditions locales et à la filière étudiée ; enfin, les étapes 3, 4 et 5 ont consisté à construire une trajectoire de transition vers le scénario régionalisé. Il s'est agi lors d'un atelier participatif de : (iii) lister les obstacles, opportunités et jalons, (iv) identifier les actions à mettre en place, et (v) construire sur une frise chronologique une trajectoire de transition.

Les ateliers de construction des trajectoires ont réuni chacun une quinzaine de participants, incluant des chercheurs, agriculteurs, conseillers agricoles, professionnels de l'alimentation, associations et pouvoirs publics locaux (tableau A.9).

2. Une filière blé dur sans pesticides chimiques en 2050 en Toscane (Italie)

La Toscane est une région du centre de l'Italie d'une superficie d'environ 23 000 km² et d'une population d'environ 3,7 millions d'habitants. La région est entourée et traversée par de grandes chaînes de montagnes. On y trouve peu de plaines, mais celles-ci sont fertiles, et le paysage est dominé par des collines, qui représentent près des deux tiers de la superficie totale de la région¹⁹.

Le blé dur est cultivé dans le monde entier, le plus grand producteur étant l'UE, où les zones de production et de culture sont concentrées dans la région méditerranéenne. L'Italie est considérée comme le leader de la production de blé dur en Europe, avec une production moyenne de 4,26 millions de tonnes au cours de la dernière décennie (Xynias *et al.*, 2020). Après la récolte, le blé dur est moulu pour produire de la semoule de blé dur, puis transformé principalement en pâtes. Les pâtes sont ensuite vendues aux consommateurs par le biais de différents réseaux de distribution. Elles constituent une part importante du régime alimentaire des Italiens, qui en consomment en moyenne 23,1 kg par an, suivis par les Tunisiens, les Vénézuéliens et les Grecs (Bresciani *et al.*, 2022).

■ Les principales tendances concernant la filière blé dur en Toscane

Les systèmes de culture sont spécialisés avec un choix restreint de variétés cultivées (blé dur, blé tendre, tournesol, maïs, sorgho, soja, féverole, quelques légumineuses) et une courte séquence de cultures (2 à 5). Le choix variétal a évolué vers des variétés résistantes et la redécouverte d'anciennes variétés. La tendance est à la réduction

19. Selon les données en ligne de l'Istat (Italian National Institute of Statistics). <http://dati.istat.it>

des engrais de synthèse en raison de l'augmentation des coûts énergétiques et d'un regain d'intérêt pour le labour afin de lutter contre les adventices résistantes lors de la préparation du sol. Les intercultures sont utilisées en agriculture biologique.

La taille des exploitations a augmenté au cours des dernières décennies ; elle est en moyenne d'environ 200 ha, avec un nombre décroissant d'exploitations. Une tendance à la polarisation des activités agricoles est observée, avec une spécialisation dans la production céréalière ou dans la production animale. Les capitaux proviennent principalement d'investisseurs privés, les subventions publiques étant axées sur des investissements spécifiques ciblés.

Les technologies numériques sont de plus en plus présentes dans les exploitations agricoles. Aujourd'hui, 10 % des exploitations ont accès aux technologies de guidage et de localisation en temps réel (RTK) et aux systèmes d'aide à la décision (DSS), qui n'existaient pas il y a dix ans. Les agriculteurs doivent encore être convaincus pour avoir confiance dans les avantages des technologies numériques (EC, 2020b).

Dans la chaîne alimentaire, le blé dur est principalement transformé en pâtes. La consommation de pâtes est en légère baisse, mais les consommateurs attendent de plus en plus des pâtes de haute qualité, sans résidus de pesticides (certifications et labels). L'Italie exporte 50 % de ses pâtes, et importe du blé, bien que ces importations soient en baisse.

■ Le scénario de production de blé dur sans pesticides chimiques en Toscane en 2050

Le choix du scénario souhaitable à partir des trois scénarios européens

Les coordinateurs régionaux ont choisi le scénario européen « Des chaînes alimentaires mondiales et européennes basées sur les technologies numériques et l'immunité des plantes pour un marché alimentaire sans pesticides chimiques » (S1). Les principales raisons de ce choix sont les tendances actuelles en matière de spécialisation et d'augmentation de la taille des exploitations, le développement des technologies numériques, le marché de distribution des pâtes (50 % d'exportation et augmentation de la consommation de pâtes au niveau mondial), et les opportunités de développement de ce marché.

Le scénario régionalisé

Voici le scénario qui a été construit à partir du scénario S1 européen, pour la filière blé dur sans pesticides chimiques en Toscane en 2050. Les principales hypothèses sont résumées dans le tableau 6.1.

Encadré 6.1. Scénario régionalisé pour la filière blé dur en Toscane

En 2050, la Toscane exporte son savoir-faire et ses productions de blé dur sans pesticides chimiques sur les marchés alimentaires internationaux. La production de blé dur a lieu dans de grandes exploitations spécialisées des plaines toscanes, équipées de technologies de pointe, permettant aux agriculteurs de travailler à très grande échelle, sans trop de main-d'œuvre et avec une vitesse de travail élevée. L'utilisation de l'agriculture de précision est répandue et presque tous les équipements utilisés, des semis au désherbage mécanique jusqu'à la récolte, sont guidés par satellite. La sélection génétique a permis de renforcer l'immunité des variétés de blé dur cultivées. Elles présentent une tolérance multiple notamment à la rouille et produisent des stimulateurs de défense afin d'accroître les effets allélopathiques. Les semences sont enrobées de biostimulants ou de micro-organismes bénéfiques pour induire une résistance aux maladies fongiques causées par les espèces de *Fusarium*. Différentes variétés de blé sont semées ensemble afin de former des cultures composites, plus résistantes aux champignons. Des micro-organismes bénéfiques sont répandus à différents stades de leur développement, et des espèces de champignons compétitives et non nocives sont pulvérisées pour concurrencer les espèces causant des maladies. Les mesures de lutte contre les adventices comprennent l'allongement des rotations afin de rompre les cycles des bioagresseurs, ainsi que des intercultures. Différentes machines, techniques de semis et le désherbage mécanique très efficace permettent de résoudre le problème de la concurrence entre le blé et les adventices. Les agriculteurs ont recours à des technologies numériques pour surveiller la pression des bioagresseurs sur les parcelles et obtenir des conseils sur les options de gestion des cultures. Ils restent les décideurs et sont aidés dans leurs choix par des outils d'aide à la décision (OAD), qui s'appuient sur l'intelligence artificielle et sur la modélisation prédictive. Ils sont reliés à des drones et à des capteurs pour la détection en temps réel des bioagresseurs. L'application précise du contrôle ciblé décidé par l'agriculteur est exécutée par de petits robots à navigation autonome. Des lois encadrent la propriété et les usages de ces données.

Une fois récolté, le blé dur est stocké dans des silos équipés de solutions préventives pour éviter le développement de parasites, en particulier d'insectes. Pour faire face à la qualité variable du blé dur, les installations de production sont équipées de trieurs de semences qui sélectionnent les grains de blé dur selon des critères de qualité et mélangent différentes variétés. Le blé dur est utilisé pour produire des semoules et des pâtes, livrées sur les marchés nationaux, européens et internationaux. En effet, la réputation de haute qualité du blé dur toscan a dépassé les frontières de l'Italie. Le marché d'exportation des pâtes toscanes est très développé en Europe, en Amérique et a atteint l'Asie. Outre les pâtes standards, des gammes de pâtes haut de gamme valorisent la production toscane locale, avec d'anciennes variétés traditionnelles de blé dur aux propriétés de qualité supérieure. Elles sont produites à l'aide d'anciens équipements remis au goût du jour dans les usines de pâtes, avec des matériaux plus simples intégrés dans des lignes de production hautement automatisées et contrôlées numériquement. Grâce à la technologie *blockchain*, les pâtes sont entièrement traçables tout au long des chaînes d'approvisionnement, de la ferme à la table, de manière sécurisée, non modifiable et transparente.

Tableau 6.1. Résumé des hypothèses formant le scénario pour la filière blé dur sans pesticides chimiques en Toscane en 2050

Systèmes de culture	Le blé dur est protégé contre les bioagresseurs par des solutions qui renforcent le système immunitaire de la plante : sélection variétale, utilisation de biostimulants et de biocontrôle pour la protection contre les champignons. Le désherbage mécanique et une rotation plus longue des cultures permettent de lutter contre la concurrence entre les adventices et le blé. Les engrais organiques et les engrais complexes organominéraux, ainsi que les engrais provenant de différents sous-produits, sont couramment utilisés.
Agroéquipements et technologies numériques	L'utilisation de l'agriculture de précision s'est répandue et presque tous les équipements utilisés, du semis au désherbage mécanique jusqu'à la récolte, sont guidés par satellite. Les agriculteurs sont aidés dans leurs choix par l'utilisation d'outils d'aide à la décision (DSS) qui s'appuient sur l'intelligence artificielle basée sur des années d'observation et sur la modélisation prédictive.
Chaîne de valeur alimentaire	Le blé dur est utilisé pour produire de la semoule et des pâtes, livrées sur les marchés nationaux, européens et internationaux (Amérique, Asie), en raison de la réputation de haute qualité de la production toscane. Les produits comprennent des gammes de pâtes standards et de pâtes haut de gamme valorisant la production toscane locale, avec d'anciennes variétés traditionnelles de blé dur qui ont un goût et une qualité supérieure.
Structures d'exploitation	La majorité des exploitations agricoles toscanes sont grandes et spécialisées. Elles sont équipées de technologies de pointe. Elles nécessitent une main-d'œuvre limitée.

■ La trajectoire de transition vers la filière blé dur sans pesticides chimiques en Toscane d'ici à 2050

Les principaux jalons et actions nécessaires à la transition

La sélection variétale est très importante tout au long de la transition, afin de développer des variétés présentant une tolérance multiple aux bioagresseurs. Il s'agit d'un processus continu d'ici à 2050, soutenu par un ambitieux « plan national italien pour l'agriculture » visant à promouvoir le transfert de la recherche et de l'innovation, financé par le gouvernement. Très tôt dans la transition, l'accès des agriculteurs aux technologies numériques est facilité par leur détaxation. Un réseau est créé pour relier les fermes pilotes aux fermes pour le transfert de connaissances, financé par la région Toscane. En 2030, un système d'aide à la décision est adopté par les agriculteurs. Il a été créé grâce au travail conjoint de spécialistes des logiciels et de spécialistes de l'agriculture, avec des fonds de l'UE destinés à des projets numériques. En 2030, 50 % des terres cultivées utilisent l'agriculture de précision. Les agriculteurs ont été formés par des agronomes et sont soutenus financièrement par des prêts bancaires. Les systèmes de culture ont évolué en faveur de la protection de la biodiversité et de l'amélioration de la planification, avec des rotations de cultures plus longues, des cultures intermédiaires, l'agroforesterie et la mise en place de cultures de couverture. Cette évolution est le résultat du « plan national pour l'agriculture » afin de transférer les innovations, y compris à l'échelle régionale par l'intermédiaire de réseaux d'exploitations agricoles.

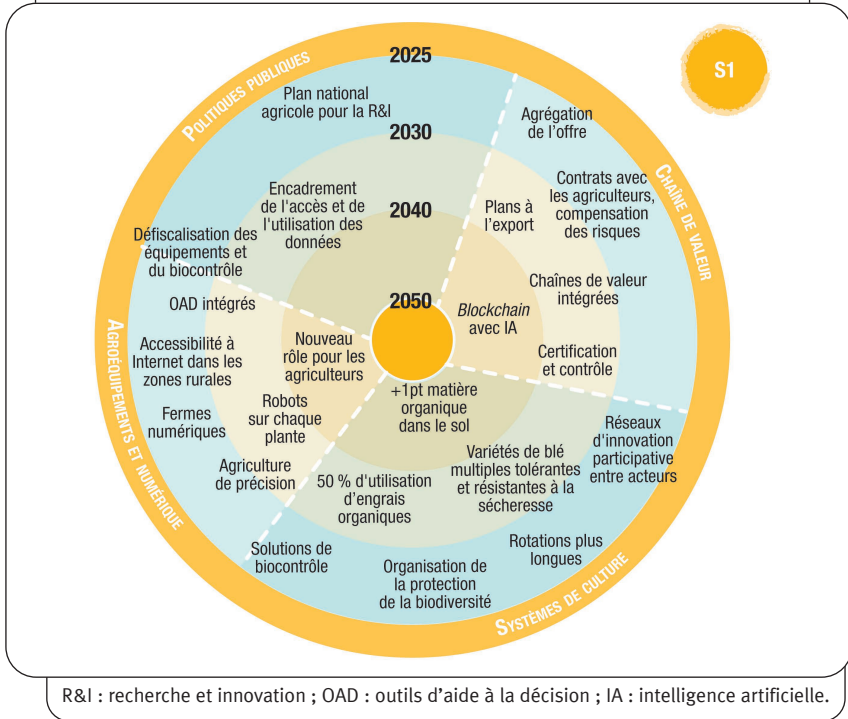
En 2040, l'utilisation d'engrais organiques a augmenté pour atteindre 50 % de l'utilisation totale d'engrais, encouragée par des politiques publiques et des réglementations visant à stimuler la croissance du marché des engrais organiques. En 2050, en Toscane, le taux de matière organique du sol a augmenté d'un point par rapport à sa teneur en 2022, grâce aux étapes précédentes, aux programmes de recherche et aux mesures de la PAC visant à faciliter l'adoption de techniques innovantes par les agriculteurs. En 2050, les agriculteurs jouent un nouveau rôle en tant qu'« innovateurs », adoptant des innovations adaptées aux besoins de la production de blé dur en Toscane.

La chaîne de valeur et ses acteurs jouent un rôle clé dans la transition. Des contrats sont mis en œuvre pour les agriculteurs afin de compenser les surcoûts liés à la transition vers des produits sans pesticides chimiques et à l'adaptation aux événements climatiques. La gestion des risques économiques est partagée par l'ensemble du secteur. Par ailleurs, pour créer un marché de « sans pesticides », les acteurs de l'agroalimentaire mettent en place une certification, avec des informations sur les étiquettes des produits, afin de valoriser auprès des consommateurs la qualité supérieure des produits toscans. La certification est volontaire et constitue un moyen d'assurer des revenus plus élevés aux agriculteurs et à l'industrie alimentaire. Le conseil agricole se développe pour accompagner les agriculteurs dans ce système beaucoup plus complexe, orienté vers les technologies, la diversification, les OAD, etc., et diffuse les connaissances auprès des agriculteurs. Ceci est rendu possible par la création d'un réseau participatif sur l'innovation. Il s'agit d'un système national AKIS, gratuit et public, regroupant les universités, les agriculteurs, les producteurs, qui organise des plates-formes d'innovation communes, des contrats collectifs, des incitations à l'adoption de l'innovation, etc.

L'agrégation des produits est une étape importante de la transition pour permettre aux agriculteurs d'avoir une influence plus importante à l'intérieur de la chaîne de valeur. D'ici 2040, des modèles logistiques utilisant l'intelligence artificielle sont mis en œuvre, comme la *blockchain*. Ils garantissent une traçabilité totale de la ferme à la table. Cela est rendu possible par des investissements publics visant à améliorer le réseau internet dans toute la région. De plus, une école technique forme les futurs experts aux nouvelles technologies numériques dans l'ensemble du système alimentaire. Ceci aboutit au final à une intégration de l'ensemble du secteur, y compris de la chaîne d'approvisionnement (logistique).

La trajectoire de transition et son récit résumé

Figure 6.2. Diagramme présentant les principales étapes de la trajectoire de transition vers la filière blé dur sans pesticides chimiques en Toscane d'ici 2050



Les acteurs mondiaux de la production et de la distribution alimentaires fixent des standards de production couvrant, entre autres, l'utilisation des pesticides chimiques. Ils passent contrat avec des agriculteurs de Toscane pour la compensation du risque lié à la transition. Les agriculteurs sont regroupés en grandes coopératives qui agrègent l'offre de produits. Ils sont certifiés conformément aux standards privés, et ont accès à un réseau d'innovation participative ainsi qu'à un soutien technique. Un plan national d'agriculture finance des activités de recherche et d'innovation concernant la sélection variétale, le numérique, et la défiscalisation des investissements des agriculteurs dans ces domaines. Ces derniers mobilisent ces nouvelles technologies d'agriculture de précision pour réduire progressivement l'usage des pesticides. Ils gèrent également la santé des sols pour les enrichir en matière organique. La filière blé dur toscane est pleinement intégrée, et exporte sur les marchés internationaux.

3. La filière maraîchère sans pesticides chimiques dans le sud sud-est de la Roumanie en 2050

L'agriculture est très importante en Roumanie pour l'économie du pays et l'emploi : en 2018, elle représentait 61 % de la valeur ajoutée de la chaîne alimentaire. Les secteurs agricoles les plus importants en valeur en Roumanie sont les céréales, les légumes et les plantes horticoles. La production de légumes représente 13,1 % du total des revenus agricoles en 2018 (EC, 2020d). Le sud et le sud-est de la Roumanie sont considérés comme la zone la plus favorable pour le maraîchage. Toutes les espèces peuvent être cultivées, y compris les espèces thermophiles (melons, avoine, concombres, tomates, aubergines, etc.). La production de légumes est de 3 501 427 tonnes en 2020, avec une très faible part de bio. Les légumes les plus cultivés sont la tomate, le chou blanc, le poivron, l'aubergine, l'oignon et l'ail. Entre 2014 et 2018, bien que les surfaces cultivées en légumes aient diminué, la production a augmenté (Chirciu et Fulgeanu, 2019).

I Les principales tendances concernant le maraîchage en Roumanie

Les agriculteurs choisissent de cultiver des variétés bien établies ou d'en tester de nouvelles. La lutte biologique contre les bioagresseurs pourrait devenir la stratégie de protection standard, grâce à l'utilisation croissant de produits de biocontrôle principalement issus de micro-organismes, tels que baculovirus, des champignons et virus entomopathogènes. L'intégration de nouveaux dispositifs de surveillance des bioagresseurs (pièges à phéromones, capteurs, satellites) se développe. Dans un futur très proche, l'utilisation des ressources en eau deviendra un défi majeur pour lequel des solutions proactives devront être rapidement trouvées. Actuellement, les systèmes de surveillance des cultures sont principalement constitués de thermomètres, de pièges, de lampes UV et de stations météorologiques. Certaines innovations se développent, comme les caméras vidéo 3D qui peuvent mesurer le volume de la plante, reconnaître les couleurs, etc. Les grandes exploitations ont réussi à investir et à mettre en œuvre des systèmes de surveillance modernes. À l'avenir, les subventions et les consultants devraient accompagner les agriculteurs dans l'adoption de ces outils modernes. Les exploitations maraîchères sont dans leur grande majorité gérées au niveau familial. La taille des exploitations varie de 0,1 à 10 ha. Les grandes exploitations commencent à faire appel à des consultants et à investir dans de nouvelles technologies. À l'avenir, l'accès aux marchés pourrait être davantage facilité par des plates-formes en ligne.

Les légumes jouent un rôle central dans l'alimentation des Roumains. Une tendance de consommation est le retour au goût traditionnel et à l'aspect des légumes anciens. Ils recherchent également des légumes de meilleure qualité, sans résidus de pesticides, pour des raisons de santé. La demande en produits bio augmente de plus de 10 % chaque année, même si la Roumanie est l'un des pays européens où la superficie consacrée aux cultures bio est la plus faible (2,9 %). À l'avenir, la chaîne de valeur

maraîchère devrait se développer davantage et intégrer des acteurs tels que les coopératives rassemblant des producteurs, des transformateurs, des unités de stockage, des distributeurs et les consommateurs.

■ Le scénario de filière maraîchère sans pesticides chimiques dans le sud sud-est de la Roumanie en 2050

Le choix du scénario souhaitable à partir des trois scénarios européens

Les coordinateurs régionaux ont choisi le scénario européen « Des chaînes alimentaires européennes basées sur les holobiontes des plantes, les microbiomes du sol et des aliments, pour des aliments et des régimes sains » (S2). Les raisons de ce choix sont liées principalement aux tendances des consommateurs et à leur intérêt croissant pour des régimes alimentaires sains où les légumes jouent un rôle clé. Aussi, les conditions agronomiques de la région, et en particulier les conditions pédologiques très favorables justifient ce choix. Dernière raison, la tendance d'évolution des modes de protection des cultures vers le développement de l'utilisation de solutions à base de bactéries, de champignons et de virus.

Le scénario régionalisé

Voici le scénario qui a été construit à partir du scénario S2 européen, pour la filière maraîchère sans pesticides chimiques en Roumanie en 2050. Les principales hypothèses sont résumées dans le tableau 6.2.

Encadré 6.2. Scénario régionalisé pour la filière maraîchère dans le sud sud-est de la Roumanie

Des organisations d'agriculteurs du sud-est de la Roumanie tirent parti des bonnes qualités du sol et entretiennent les interactions entre le microbiome du sol et celui des plantes cultivées, afin de produire des légumes sans pesticides qui sont pleinement intégrés au régime alimentaire sain des Roumains.

Les légumes sont cultivés sans pesticides chimiques dans des exploitations familiales regroupées au niveau régional, qui partagent les installations de stockage, développent ensemble des stratégies de marketing et de vente. Les maraîchers n'utilisent plus de pesticides chimiques et ont accès à différentes solutions, qui reposent sur quatre leviers principaux : la gestion des microbiomes du sol adaptée aux légumes, la surveillance du sol et des bioagresseurs, la diversification des cultures et les pratiques de fertilisation. Un levier important pour la protection des cultures est la gestion de l'holobionte des légumes, et la relation du microbiome du sol à la plante. En analysant la composition du microbiome du sol, les agriculteurs connaissent les réservoirs de diversité microbienne. Ils modulent alors ces microbiomes à l'aide de solutions de biocontrôle par l'inoculation de micro-organismes et par le choix des cultures. Les variétés de légumes sont sélectionnées dans la banque de semences roumaine, afin d'être adaptées aux conditions agro et pédoclimatiques locales ainsi qu'au microbiome du sol.

Les cultures et les plantes de couverture sont choisies de manière à augmenter la matière organique du sol et à renforcer le système immunitaire des plantes. Une fertilisation précise et non chimique est privilégiée afin de renforcer les capacités de recrutement des plantes cultivées et de réduire la virulence des bioagresseurs. Les solutions agroécologiques pour la protection des cultures incluent également le choix d'associations de cultures : légumes, céréales, légumineuses et plantes aromatiques. Ce système de culture nécessite une forte coopération entre les acteurs : les agriculteurs sont regroupés en coopératives, qui fournissent des outils, des données et des solutions techniques. Il existe également une forte coordination avec les chercheurs qui fournissent des conseils, une aide à la planification et à la prévention, ainsi qu'avec les entreprises informatiques. Tous ces acteurs sont des partenaires dans l'ensemble de la chaîne alimentaire. La taille moyenne des exploitations a augmenté, mais il demeure une diversité de tailles d'exploitation dans la région. Elles sont principalement détenues par des familles qui travaillent ensemble avec le soutien des voisins. Les jeunes agriculteurs ont accès à l'éducation et aux formations. Ils sont encouragés à adopter des innovations en matière de protection des cultures.

La production de légumes est diversifiée et comprend des tomates, des concombres, des aubergines, des melons, des oignons, des brocolis, etc. Les légumes sont cultivés en plein champ et dans des espaces protégés (serres, par exemple). Ils sont principalement vendus frais, en vente directe, dans des entrepôts régionaux appartenant à la coopérative régionale. Ils peuvent également être vendus sur les marchés locaux et périurbains, en particulier ceux de la région de Bucarest. Il existe des unités de transformation, appartenant aux organisations d'agriculteurs, où les légumes sont séchés, congelés ou mis en conserve, et vendus sur les marchés locaux, régionaux et nationaux, voire internationaux dans le cas des légumes sous label de qualité.

Les consommateurs roumains accordent une grande attention à la qualité de leur alimentation. Les impacts des pesticides chimiques sur la santé humaine sont bien connus des consommateurs et des autorités de santé publique, qui ont décidé d'en interdire l'utilisation. Une alimentation saine consiste à consommer une diversité de produits alimentaires, de saison, en majorité cuisinés à la maison, peu transformés, produits avec des recettes traditionnelles. Les régimes riches en légumes sont encouragés pour équilibrer le microbiome intestinal et prévenir le développement de maladies chroniques liées à la consommation croissante d'aliments ultratransformés. Les légumes sont accessibles à tous puisqu'ils sont considérés comme des produits prioritaires, et sont donc soutenus et promus par les autorités sanitaires du gouvernement roumain.

Les maraichers organisent les chaînes de valeur à différentes échelles : chaînes courtes et systèmes alimentaires locaux, mais aussi chaînes de valeur plus complexes. Les chaînes de distribution courtes permettent d'instaurer un fort niveau de confiance et de transmettre des informations directement aux consommateurs. Les légumes sont également vendus en dehors de la région de production en valorisant la qualité et l'identité régionale. Les coopératives de producteurs de légumes sont des fournisseurs réguliers des grands distributeurs. Elles se concentrent sur la *blockchain*, l'intégration des données, leur traçabilité et les accords collectifs afin d'améliorer la qualité des aliments tout au long de la chaîne de valeur.

Tableau 6.2. Résumé des hypothèses formant le scénario de filière maraîchère sans pesticides chimiques en Roumanie en 2050

Systèmes de culture	Une diversité de légumes est cultivée sans utiliser de pesticides chimiques, en s'appuyant sur quatre leviers principaux : la gestion des microbiomes du sol adaptée aux légumes, la surveillance du sol et des bioagresseurs, la diversification des cultures, et les pratiques de fertilisation.
Agroéquipements et technologies numériques	La technologie est appliquée dans les fermes, avec différents capteurs, des systèmes d'imagerie (satellites, drones, etc.), des applications pour les exploitations agricoles avec des systèmes d'aide à la décision et des services de mesure des indicateurs de la santé des sols et de la dynamique des bioagresseurs.
Chaîne de valeur alimentaire	Les légumes sont un élément clé du régime alimentaire des Roumains, qui accordent une grande importance à leur santé. Ils consomment une grande diversité de légumes, provenant principalement de chaînes courtes et de systèmes alimentaires locaux, mais aussi de circuits de distribution plus complexes, régionaux ou nationaux. Les légumes sont accessibles à tous puisqu'ils sont considérés comme des produits prioritaires, et sont donc soutenus par les autorités.
Structures d'exploitation	Les exploitations familiales s'associent au niveau régional, afin de partager des installations de stockage, de développer des stratégies de marketing et de vente. Les jeunes communautés d'agriculteurs sont formées aux nouvelles techniques. Les agriculteurs, les chercheurs, les entreprises informatiques et les conseillers sont des partenaires dans l'ensemble de la chaîne alimentaire.

■ La trajectoire de transition vers la filière maraîchère sans pesticides chimiques en Roumanie d'ici à 2050

Les principaux jalons et actions nécessaires à la transition

L'un des jalons clés de la transition vers des systèmes maraîchers sans pesticides chimiques est l'augmentation de la biodiversité dans les exploitations, par la mise en place de systèmes de culture appropriés : introduction de nouvelles combinaisons d'espèces, diversité de cultures, y compris des espèces répulsives, bandes fleuries, inoculation de micro-organismes de biocontrôle, etc. Cela nécessite une collaboration entre les parties prenantes et notamment la recherche, le développement de technologies faciles à utiliser et à mettre en œuvre, et des politiques de soutien.

Un autre jalon important est le travail sur le renforcement des sols, qui nécessite un suivi de leur qualité par le biais d'analyses d'échantillons de sol, puis la mise en place de pratiques adaptées : la rotation et la diversification des cultures, l'inclusion de cultures adaptées pour la protection des sols, les brise-vent, le reboisement. Les agriculteurs bénéficient de subventions publiques, de conseils spécialisés publics, de plates-formes de démonstration, ainsi que d'une collaboration étroite entre les chercheurs et les agriculteurs.

Les jalons et les actions en matière d'agroéquipement visent à mettre en place des outils de surveillance pertinents dans les différentes zones de production de légumes, afin de pouvoir obtenir des données précises sur le sol, les microbiomes des plantes

et les nutriments. Cela nécessite de la recherche, de l'innovation et la formation des agriculteurs pour l'adoption de ces outils.

Alors que la gestion de la chaîne d'approvisionnement était peu développée par le passé, des liens commencent progressivement à se tisser entre les producteurs, les négociants et les transformateurs. Afin de mettre en œuvre des circuits courts, un cadre juridique et réglementaire définit puis soutient son développement par le biais de subventions. Ensuite, des réseaux numériques seront créés afin de partager les informations entre acteurs et jusqu'aux consommateurs, évoluant vers des plates-formes informatiques puis des *blockchains*.

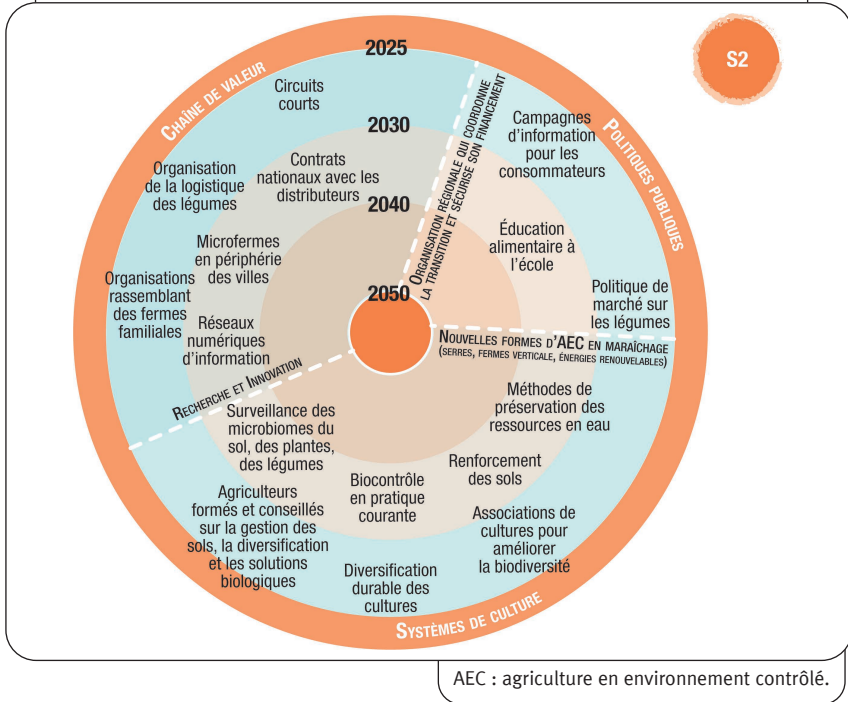
De même, un cadre législatif pour les exploitations agricoles familiales permettra de soutenir leur développement et de créer un environnement favorable à la coopération : association d'exploitations agricoles, petits producteurs s'associant et travaillant ensemble. Cette association de fermes dans des systèmes coopératifs est soutenue financièrement, à la fois pour sa production et pour la fourniture d'infrastructures.

L'éducation des consommateurs sur l'importance d'une alimentation saine est également une action très importante dans la transition. Elle se fait par le biais de campagnes médiatiques et de programmes d'éducation pour les enfants.

Un jalon est lié à la mise en place de microfermes en périphérie des villes, où les habitants produisent leurs propres légumes. Ils sont guidés grâce à des plates-formes de démonstration et ont accès à toutes les informations nécessaires à leur production. Ces microfermes sont installées dans les zones urbaines et périurbaines ou dans les campagnes proches des villes. Elles sont développées par des associations locales et constituent un nouveau modèle d'entreprise.

La trajectoire de transition et son récit résumé

Figure 6.3. Diagramme présentant les principales étapes de la trajectoire de transition vers la filière maraîchère sans pesticides chimiques en Roumanie d'ici 2050



L'adoption d'un régime alimentaire sain par les consommateurs est facilitée par des politiques de marché visant à rendre les légumes plus accessibles, et par l'ajout de cours de nutrition dans les programmes scolaires. Les exploitations familiales, soutenues par des programmes nationaux et des fonds européens, se sont regroupées pour la mise en commun d'agroéquipements et de données. Elles sont en contrat avec des distributeurs nationaux et régionaux et développent des circuits courts. Les agriculteurs bénéficient de formations sur l'holobionte, qui sont financées par les pouvoirs publics, ainsi que de conseils de spécialistes publics pour les accompagner dans la diversification, l'utilisation d'engrais organiques et l'augmentation de la biodiversité dans le maraîchage. Ils utilisent les outils de pointe pour surveiller les nutriments du sol et les microécosystèmes, et adaptent leurs systèmes de culture pour préserver la santé des sols. L'agriculture en environnement contrôlé se développe en utilisant les énergies renouvelables, et se diversifie notamment avec les fermes verticales.

4. La filière céréales et oléagineux dans le sud de la Finlande en 2050

La Finlande est située en Europe du Nord, principalement entre les 60° et 70° latitudes, ce qui impose certaines contraintes quant aux plantes qui peuvent être cultivées et à l'endroit où elles peuvent l'être (principalement dans les parties méridionales et occidentales du pays). Les céréales représentent environ 14 % de la production agricole finlandaise en moyenne sur la période 2018-2020 (EC, 2021a). Quatre céréales sont produites à grande échelle : l'orge, l'avoine, le blé et le seigle (VYR, 2014).

■ Les principales tendances concernant les céréales et les oléagineux dans le sud de la Finlande

Les semences utilisées sont des variétés adaptées aux conditions climatiques spécifiques de la région (saison courte, climat frais et longues journées). L'utilisation de pesticides chimiques en Finlande tend à diminuer, sauf pour l'urée (Tukes, 2021). La protection des cultures passe par l'utilisation de pesticides chimiques et d'alternatives telles que la sélection de variétés résistantes, la rotation et la diversification des cultures (Peltonen-Sainio et Jauhiainen, 2019) ainsi que le désherbage mécanique (Vanhala, 2006). De plus en plus, les décisions relatives à la protection des cultures sont basées sur des observations de terrain, et des valeurs seuils d'apparition des bioagresseurs. La part de l'AB a augmenté au cours des dix dernières années (Kujala *et al.*, 2022). À l'avenir, il devrait y avoir une augmentation de l'AB, sa rentabilité étant plus élevée que celle de la production conventionnelle, puisqu'elle est soutenue par la PAC et le programme national (Ministry of Agriculture and Forestry in Finland, 2021). Le changement climatique est un facteur important pour l'évolution future de la production de céréales et d'oléagineux en Finlande : l'augmentation des températures pendant les campagnes céréalières réduit la variabilité des rendements (Peltonen-Sainio *et al.*, 2009) et modifie la pression des ravageurs (Hakala *et al.*, 2011). Plus généralement, le maintien de la rentabilité de l'agriculture finlandaise est un enjeu important.

Les céréales sont principalement transformées en produits de panification qui sont des produits de base du régime alimentaire finlandais, et les oléagineux en huiles végétales. Environ la moitié de la production annuelle de céréales est utilisée pour l'alimentation animale nationale (VYR, 2014). Ces dernières années, la demande en aliments d'origine végétale, comme le « lait » d'avoine, les huiles végétales et les produits bio a augmenté. Ces évolutions sont motivées par la volonté d'une alimentation saine et respectueuse de l'environnement (Saba *et al.*, 2010 ; Dean *et al.*, 2007). La chaîne de valeur est organisée au niveau régional, avec quelques grandes entreprises et de nombreuses petites et moyennes entreprises. La vente directe locale est une tendance croissante avec des réseaux tels que Reko. Des labels sont développés sur les produits céréaliers et oléagineux afin d'informer les consommateurs de leurs avantages nutritionnels et environnementaux (label bio, logo « choix sain »,

« délicieux produit de Finlande »). À l'avenir, la demande de produits diversifiés devrait être encore plus forte (pour des raisons de santé et de diversification des régimes alimentaires). L'importance de la production locale devrait également s'accroître en tant que moteur des choix des consommateurs, tout comme les dispositifs d'agriculture à soutien collectif.

La Finlande est une société innovante qui met fortement l'accent sur le numérique et la recherche (EC, 2020c). De nouvelles technologies sont disponibles et accessibles aux agriculteurs (télétection, drones, applications mobiles pour les services agricoles, formations virtuelles, etc.). Parmi les agriculteurs, les jeunes générations sont plus désireuses d'appliquer ces nouvelles technologies. L'intérêt pour ces solutions informatiques devrait s'accroître en raison des préoccupations environnementales des agriculteurs et de l'intérêt croissant pour l'analyse et l'interprétation des conditions de production locales.

En Finlande, les exploitations agricoles sont généralement familiales, avec une tendance à la réduction du nombre d'exploitations et à l'augmentation de leur taille (Peltonen-Sainio et Jauhiainen, 2019), même si la superficie moyenne reste plutôt modeste. L'agriculture finlandaise dépend fortement des paiements de la PAC (Huan-Niemi, 2017 ; EC, 2020c), les revenus forestiers constituant une autre source de capital pour les agriculteurs. On constate un intérêt croissant des agriculteurs, des consommateurs et de la société en général pour la protection de l'environnement. Le changement climatique et ses conséquences sur l'instabilité des systèmes agricoles pourraient compliquer la tâche de la nouvelle génération d'agriculteurs.

■ Le scénario de la filière céréales et oléagineux sans pesticides chimiques dans le sud de la Finlande en 2050

Le choix du scénario souhaitable à partir des trois scénarios européens

Les coordinateurs régionaux ont choisi le scénario européen « Des paysages complexes et diversifiés et des chaînes alimentaires régionales pour un système alimentaire européen "une seule santé" » (S3). Ce choix a été motivé par la demande croissante des consommateurs pour des produits sains, diversifiés, produits localement, et leur intérêt pour l'agriculture à soutien collectif. De plus, l'organisation principalement locale des chaînes de valeur et l'utilisation croissante des outils de surveillance de l'environnement de production par les agriculteurs sont cohérentes avec ce scénario.

Le scénario régionalisé

Voici le scénario qui a été construit à partir du scénario S3 européen, pour la filière céréales et oléagineux sans pesticides chimiques en Finlande en 2050. Les principales hypothèses sont résumées dans le tableau 6.3.

Encadré 6.3. Scénario régionalisé pour la filière céréales et oléagineux dans le sud de la Finlande

La filière finlandaise des céréales et des oléagineux fournit des produits de panification et des huiles végétales sains et durables, ainsi que des services environnementaux aux consommateurs locaux et soucieux de préserver l'environnement et la santé humaine.

En 2050, dans le sud et l'ouest de la Finlande, les céréales et les oléagineux sont produits sans pesticides chimiques, afin de répondre à la demande des consommateurs finlandais pour des aliments préservant la santé humaine et l'environnement. Les consommateurs recherchent des aliments à haute valeur nutritionnelle et peu transformés. Les Finlandais sont très soucieux de la protection de l'environnement, de la préservation des zones rurales et de la souveraineté alimentaire. En 2050, la région est auto-suffisante en protéines animales, du fait de la baisse des besoins en produits animaux qui sont désormais destinés majoritairement aux produits laitiers bio et à la production de biogaz. La société finlandaise rémunère les services environnementaux fournis par l'agriculture par des subventions publiques.

Les systèmes de culture sont diversifiés et les céréales représentent au maximum trois cinquièmes de la rotation. Les autres cultures comprennent des légumineuses pour les protéines végétales, la nutrition animale, mais aussi pour contribuer à la santé des sols. Les semences sélectionnées sont locales, adaptées aux conditions climatiques spécifiques de l'Europe du Nord, ainsi qu'aux bioagresseurs. Elles sont traitées à la chaleur pour éviter les maladies transmises par les semences et l'augmentation du risque de mycotoxines dans des conditions climatiques humides. La protection des cultures est assurée par des mesures agroécologiques qui optimisent les régulations biologiques : complexification du paysage, y compris les forêts, diversification des cultures, avec des zones tampons pour maintenir les arthropodes bénéfiques et d'autres formes de biodiversité, des banques de coléoptères, des zones fleuries autour des parcelles, etc. Les semis tardifs sont utilisés pour lutter contre certains ravageurs spécifiques tels que les espèces *Phyllotreta* sur les cultures oléagineuses. La diversification des cultures et la complexité des paysages sont également très importantes pour renforcer la résilience des systèmes de culture face aux phénomènes climatiques extrêmes qui sont désormais plus fréquents en raison du changement climatique. L'économie circulaire est favorisée et soutenue par la stratégie finlandaise de bioéconomie : les exploitations agricoles visent à boucler les cycles, par exemple par la production locale de biogaz.

La coopération entre les agriculteurs, les conseillers et d'autres acteurs au niveau territorial est en place afin de surveiller efficacement les conditions météorologiques, mais aussi l'état de l'écosystème et la dynamique des bioagresseurs. Des systèmes de surveillance numériques basés sur diverses données de télédétection sont disponibles et accessibles aux agriculteurs, et permettent d'aider à la prise de décision. Les agriculteurs sont sensibilisés et régulièrement formés à l'agroécologie et à l'utilisation des outils numériques.

Ils sont soutenus par des organisations de conseil indépendantes. Ils coopèrent au niveau territorial pour partager les machines, les connaissances et le suivi. Des activités non agricoles se sont développées (agriculture à temps partiel), telles que les services de conseil, la production de leurs propres produits de panification, la recherche, etc. L'expérimentation collective participative par le biais des laboratoires vivants permet le développement conjoint de solutions innovantes en réunissant des chercheurs, des agriculteurs et des fabricants.

Les productions agricoles sont transformées localement en produits de panification très diversifiés, peu transformés, de haute valeur nutritionnelle grâce à l'utilisation de farines de céréales complètes, de farines de légumineuses riches en protéines végétales, en fibres et en micronutriments. Les industries de la meunerie et de la boulangerie restent des PME locales. Les légumineuses sont également valorisées dans l'alimentation animale, améliorant ainsi l'autosuffisance finlandaise.

Les consommateurs achètent ces produits sans pesticides dans différents circuits alimentaires : grands distributeurs nationaux, marchés alimentaires locaux et vente directe leur permettant d'être en contact avec les agriculteurs par l'intermédiaire de plateformes numériques. L'agriculture à soutien collectif est devenue très populaire. Les labels et logos sur la durabilité des produits sont vérifiés et approuvés par les autorités publiques avant d'être utilisés sur les étiquettes des aliments. Ce contrôle par les autorités publiques a renforcé la confiance des consommateurs dans les produits finlandais.

Tableau 6.3. Résumé des hypothèses formant le scénario de la filière céréales et oléagineux sans pesticides chimiques dans le sud de la Finlande en 2050

Chaîne de valeur	Les produits céréaliers et oléagineux sont locaux et diversifiés, ils sont certifiés par les autorités finlandaises comme étant sains et respectueux de l'environnement.
Structures d'exploitation	De plus grandes exploitations familiales sont détenues par des agriculteurs soucieux de l'environnement, rémunérés pour les services environnementaux rendus, et impliqués dans d'autres activités.
Systèmes de culture	Des cultures diversifiées de céréales, d'oléagineux et de légumineuses sont protégées des bioagresseurs par des pratiques agricoles agroécologiques, basées sur les régulations biologiques, et organisent une mosaïque de cultures à l'échelle du paysage.
Agroéquipements et technologies numériques	Une coopération entre agriculteurs pour la mise en commun des équipements s'est mise en place, permettant aussi le suivi des conditions météorologiques, de la dynamique des écosystèmes et de l'évolution des bioagresseurs.

■ La trajectoire de transition vers la filière céréales et oléagineux sans pesticides chimiques dans le sud de la Finlande d'ici à 2050

Les principaux jalons et actions nécessaires à la transition

Avec le changement climatique, l'apparition de nouveaux bioagresseurs dans les régions du nord de l'Europe est envisagée, ce qui nécessitera une adaptation en matière de protection des cultures. Ainsi, un jalon en début de transition concerne la réalisation d'une étude prospective sur les « scénarios possibles concernant les risques futurs liés aux bioagresseurs pour les productions céréalières et oléagineuses en Finlande en raison du changement climatique ». Une fois ces risques identifiés, une action consiste à s'inspirer de toutes les méthodes de lutte disponibles et efficaces déjà utilisées par les agriculteurs dans d'autres régions. De plus, les agriculteurs pourront s'appuyer sur des fermes de démonstration, qui pourraient tester des

innovations, de nouvelles pratiques en matière de rotation des cultures et de protection contre les ravageurs, pour ensuite partager les résultats avec la communauté plus large des agriculteurs.

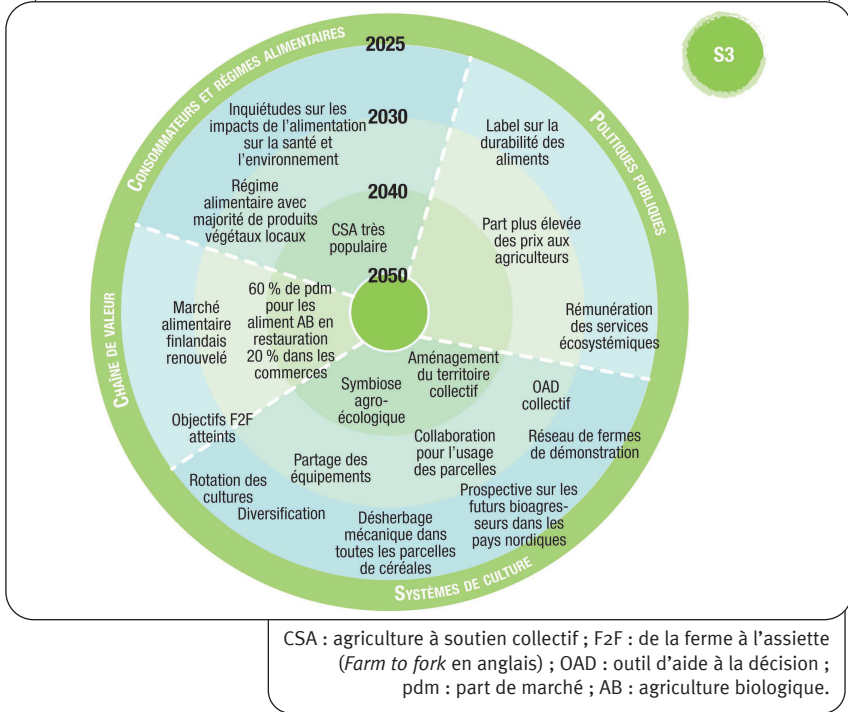
Plusieurs jalons de la transition sont liés au développement progressif de la consommation d'aliments bio, en restauration hors foyer et à domicile : « les aliments bio représentent respectivement 25 % de la part de marché en restauration et 10 % à domicile en 2030 », puis « 60 % et 20 % en 2040 ». Ces jalons poursuivent la tendance actuelle de croissance de la production et de la consommation de produits bio en Finlande. Ils seront soutenus par des subventions de la PAC et par l'utilisation du programme scolaire de l'Europe pour promouvoir la consommation d'aliments bio dans les cantines.

Un autre jalon important est l'évolution du régime alimentaire des Finlandais qui se tournent progressivement vers une majorité de produits végétaux, d'aliments peu transformés, en raison de leurs préoccupations environnementales et de préservation de la biodiversité. Cette évolution de la demande entraîne un renouvellement de l'offre alimentaire sur le marché finlandais qui comprend désormais des aliments plus diversifiés, d'origine végétale et produits localement. Cette évolution ouvre de nouvelles perspectives aux PME. Les politiques de prix sur les produits sains, ainsi qu'un label, créé au niveau européen, pour les « aliments sains » et basé sur des critères nutritionnels et environnementaux, favorisent l'atteinte de ces jalons. Pour favoriser l'acceptation des légumineuses dans les régimes alimentaires finlandais, de nouvelles variétés sont utilisées, et de nouvelles technologies développées par des entreprises privées permettent d'améliorer leur tolérance digestive.

En fin de transition, un jalon concerne la généralisation de la symbiose agroécologique sur le territoire. La symbiose agroécologique est un modèle de système alimentaire local, qui réunit de façon circulaire la production agricole, la transformation alimentaire et la production d'énergie (Koppelmäki *et al.*, 2016 ; Helenius *et al.*, 2020). Ce modèle en test dans le village de Palopuro, dans le sud de la Finlande, vise l'autosuffisance énergétique et alimentaire. Il requiert une très forte collaboration entre les différents acteurs. La collaboration se met en place progressivement tout au long de la transition ; elle est d'ailleurs citée dans de nombreux jalons. Elle s'opère à différents niveaux et répond à différents besoins : la création d'une confiance mutuelle, le partage des équipements, la co-construction de modèles d'aménagement du territoire, des plates-formes de collaboration pour les agriculteurs et, enfin, la symbiose agroécologique. Pour que ces collaborations aient lieu, les organisations locales d'agriculteurs jouent un rôle clé, de même que les conseillers agricoles, qui peuvent encourager et promouvoir les échanges de bonnes pratiques. Des campagnes de communication peuvent également promouvoir des modèles de coopération, et des subventions publiques peuvent financer la création de projets en coopération avec d'autres agriculteurs.

La trajectoire de transition et son récit résumé

Figure 6.4. Diagramme présentant les principales étapes de la trajectoire de transition vers la filière céréales et oléagineux sans pesticides chimiques dans le sud de la Finlande d'ici 2050



Les consommateurs finlandais se préoccupent de l'impact de leur régime alimentaire sur l'environnement, ce qui induit des changements dans la chaîne de valeur alimentaire : la part des produits issus de l'agriculture biologique s'accroît et le marché évolue vers une plus grande diversité d'aliments, produits localement. Les consommateurs finlandais soutiennent cette transition de l'agriculture locale, vers davantage de produits bio, avec une plus grande diversification des productions céréalières, oléagineuses et de légumineuses. La transition des systèmes de culture est facilitée par l'échange de bonnes pratiques au moyen d'un réseau de fermes de démonstration, par la rémunération des services écosystémiques, par un partage plus équitable des prix au profit des agriculteurs, et par une collaboration accrue entre agriculteurs et acteurs locaux. Elle conduit à l'implémentation de dispositifs de symbiose agroécologique rassemblant producteurs agricoles, transformateurs et fournisseurs d'énergie.

5. La filière viti-vinicole dans le Bergerac Duras en 2050

Le vignoble de Bergerac Duras se situe en Périgord sur les deux rives de la rivière Dordogne, avec une enclave dans le Lot-et-Garonne pour le pays de Duras. L'Interprofession viticole de Bergerac et Duras participe depuis 2019 au programme VitiREV (viticulture respectueuse de l'environnement), en tant que laboratoire d'innovation territoriale, ou LIT (IVBD, 2021). Plusieurs projets sont en cours, co-construits avec différents acteurs du territoire, au service de la transition environnementale.

■ Les principales tendances concernant la filière viti-vinicole en Bergerac Duras

Le vignoble de Bergerac Duras couvre 12 500 ha de vignes (Insee, 2018), dont 30 % sont certifiés en agriculture biologique ou en conversion. On observe une forte progression des certifications – agriculture biologique (AB) et haute valeur environnementale (HVE). Les choix variétaux se font dans le respect des cahiers des charges AOC et de l'indication géographique protégée (IGP) du Bergerac Duras. Certains cépages résistants sont en cours d'expérimentation sur le vignoble du Duras. Deux conservatoires des cépages ont été créés, dont un dédié aux variétés autochtones (muscadelle, mérille).

La pression réglementaire augmente sur les utilisations de pesticides. Les vigneronnes mettent en place des alternatives (Barbier *et al.*, 2018), et sont impliqués dans des programmes de recherche et développement (vinopole²⁰, vitidata²¹, etc.). Ainsi, des solutions de biocontrôle se mettent en place, comme la confusion sexuelle sur les parcelles de Monbazillac. La préservation des auxiliaires et les infrastructures agroécologiques se développent, par exemple la prédation des ravageurs par les chauves-souris. Dans le futur, les enjeux pour le vignoble liés aux préoccupations de santé et aux attentes sociétales devraient encore augmenter. À cela s'ajoutent l'impact du changement climatique sur le futur du vignoble en Bergerac Duras (Ollat *et al.*, 2016) ainsi que les enjeux économiques de rentabilité du vignoble (Aouadi *et al.*, 2020) et de sélection variétale (variétés résistantes, adaptées au changement climatique, autochtones).

La gamme de vins de Bergerac Duras est très diversifiée : blancs secs, rouges de garde, rosés. Le vin à reste de sucre représente plus de 50 % de la production (moelleux Monbazillac, Saussignac, etc.). Les producteurs sont environ pour moitié des vigneronnes indépendants, et moitié regroupés en coopératives. Le négoce est principalement coopératif (couleurs d'Aquitaine). La filière est bien organisée avec une fédération (FVBD) et une interprofession (IVBD). Les vins sont majoritairement distribués par la GMS (grandes

20. <https://www.vinopole.com/>

21. <https://observatoire-vitidata.fr/>

et moyennes surfaces), mais aussi par le réseau CHR (café hôtel restaurant), du marché national. L'export représente moins de 10 % du marché et est stable (Insee, 2018).

Les équipements et outils de travail du sol se sont très fortement développés (désherbage) durant les dernières années. Aujourd'hui, les viticulteurs utilisent les machines à vendanger, les outils d'aide à la décision (OAD) comme Décitrait²². Les évolutions futures concernent la mutualisation des équipements de type robot à l'intérieur des coopératives. Les OAD devraient également fortement se développer.

Les exploitations sont majoritairement familiales, et font appel à des entreprises de service pour la main-d'œuvre lors, notamment, des vendanges. Il apparaît de plus en plus difficile de trouver de la main-d'œuvre, qualifiée ou non. L'enjeu de disponibilité et de formation de la main-d'œuvre est critique pour le futur. On anticipe dans l'avenir une augmentation de la présence des coopératives pour accroître les capacités commerciales. Les exploitations sont spécialisées en viticulture, même si la polyculture est majoritaire en Duras (pruniers, céréales et un peu d'élevage). Dans le futur, cette tendance à un retour à la diversification pourrait s'accroître, pour tenir notamment compte des aléas climatiques. Deux tendances d'évolution notables sont identifiées. La première concerne l'agrandissement des exploitations et le vieillissement des vignerons, qui pose le problème de la transmission, avec différentes hypothèses d'évolution possibles : reprise par des jeunes, rachat par d'autres propriétés et reprise par des nouveaux ruraux. La seconde concerne la volonté des viticulteurs de mieux valoriser leurs productions et donc de développer le vin en bouteille aux dépens du vrac.

■ Le scénario de la filière viti-vinicole sans pesticides chimiques dans le Bergerac Duras en 2050

Le choix du scénario souhaitable à partir des trois scénarios européens

Les coordinateurs régionaux ont choisi le scénario européen « Des paysages complexes et diversifiés et des chaînes alimentaires régionales pour un système alimentaire européen "une seule santé" » (S3). Les raisons de ce choix sont basées sur les tendances actuelles, comme la mise en place d'infrastructures agroécologiques et les diagnostics paysagers réalisés sur le vignoble de Pécharmant. De plus, la filière est très bien structurée au niveau du territoire par le biais des interprofessions. Elle est en outre très dynamique. Les approches collectives et participatives sont déjà en place, et les viticulteurs habitués à fonctionner collectivement dans le cadre des coopératives, notamment des coopératives d'utilisation des matériels agricoles (CUMA).

22. <https://gironde.chambre-agriculture.fr/outils-daide-a-la-decision/decitrait/>

Le scénario régionalisé

Voici le scénario qui a été construit à partir du scénario S3 européen, pour la filière viti-vinicole sans pesticides chimiques en Bergerac Duras en 2050. Les principales hypothèses sont résumées dans le tableau 6.4.

Encadré 6.4. Scénario régionalisé pour la filière viti-vinicole dans le Bergerac Duras en France

En 2050, les mentions d'origine – AOC, IGP – des vins de Bergerac et de Duras valorisent leur qualité gustative, le savoir-faire viticole et aussi leurs performances environnementales notamment sur la préservation de l'eau, des sols, et de la biodiversité dans le territoire. Le paysage du vignoble a été reconçu pour favoriser les régulations biologiques et protéger la vigne sans recours aux pesticides chimiques. Il se compose de rangs de vigne associés à d'autres cultures comme les arbres fruitiers (pruniers, noisetiers) qui fournissent des productions complémentaires. Les vignes sont bordées de haies, de prairies pour le pâturage, de cultures céréalières et de bois. Ces mosaïques de culture sont imbriquées à des habitats semi-naturels afin de favoriser les continuités écologiques : des bosquets, des bandes fleuries, des mares, des branchages et des linéaires de haies. Elles favorisent les auxiliaires et créent des étages de végétation avec une diversité de milieux limitant et régulant la propagation des ravageurs. Par exemple, les chauves-souris prédatrices d'eudémis et de cochylis (tordeuses de la grappe) peuvent s'y développer, de même que les oiseaux insectivores ou granivores qui contribuent à réguler les ravageurs et les adventices. Les cépages utilisés sont diversifiés génétiquement d'une parcelle à l'autre afin de favoriser la résilience : ils intègrent des variétés autochtones, mieux adaptées au changement climatique, garantissant la typicité des vins des appellations, ainsi que des variétés résistantes aux principales maladies y compris aux nouveaux cortèges de bioagresseurs apparus du fait du changement climatique. Les paysages sont conçus à partir de diagnostics paysagers réalisés sur chaque exploitation, et ensuite travaillés à l'échelle du territoire, en faisant appel aux viticulteurs, mais aussi aux autres acteurs impliqués dans ces paysages. Un contrat social de territoire lie les viticulteurs et les habitants pour préserver la biodiversité locale et les ressources naturelles, et les rémunère pour les services environnementaux rendus. Tout un dispositif de surveillance du paysage qui intègre une multiplicité de données (données climatiques, morphologie spatiale des paysages, données issues de capteurs en réseau) est en place, coordonné par les organisations professionnelles, les conseillers viticoles et des équipes de recherche spécialisées dans les interactions entre paysages et bioagresseurs. Ainsi, les viticulteurs disposent d'outils d'aide à la décision basés sur ces données d'observation et leur historique, anticipant par des données et des modèles numériques les dynamiques des bioagresseurs et proposant les mesures de prévention adaptées.

Des expérimentations ont été mises en place avec les constructeurs et les fournisseurs d'agroéquipement pour co-construire des équipements adaptés au paysage et à la gestion des bioagresseurs, et répondant aux enjeux de sobriété technologique et énergétique. En effet, il y a désormais une responsabilité sociale des firmes d'agroéquipements qui sont tenues de développer des innovations éthiques régulant les impacts sociaux et environnementaux.

Les exploitations viticoles restent familiales, gérées par de nouvelles générations de viticulteurs formés à la transition agroécologique et soutenus financièrement par la collectivité. Ces viticulteurs se sont organisés sous forme de coopératives pour mutualiser les équipements, le transport, le négoce, les outils de surveillance, mais aussi la conception des paysages. Sur le territoire, la diversité des exploitations agricoles est maintenue. On trouve, aux côtés des coopératives, des viticulteurs indépendants ayant un rôle d'ambassadeurs vis-à-vis de la filière, et aussi des viticulteurs néoruraux qui mènent des expérimentations sur des exploitations de plus petite taille.

L'ensemble de ces pratiques agroécologiques est valorisé auprès des consommateurs des vins de Bergerac Duras. Les indications d'origine Bergerac Duras intègrent des critères de contribution au renforcement de la biodiversité dans leur cahier des charges, et les mettent en visibilité sur l'étiquette de leurs produits au moyen du label « Réserve de biosphère ». Les vins de Bergerac Duras sont ainsi très bien valorisés, vendus à un prix équitable, chaque consommateur qui achète une bouteille de ces vins participe à la préservation de la biodiversité et à la rémunération des producteurs. Les nouvelles productions agricoles liées à la diversification des cultures – fruits, noix, céréales, productions animales, etc. – sont également valorisées par le label « Réserve de biosphère » et vendues aux consommateurs en circuit court. Une application digitale permet aux consommateurs d'avoir une forte traçabilité du produit concernant sa composition et l'évaluation des impacts des pratiques viticoles sur les milieux, et de visualiser le paysage du vignoble dont son vin est issu.

Le territoire de Bergerac Duras est renommé pour la qualité de ses vins, la beauté de ses paysages et sa préservation de l'environnement et de la biodiversité. L'œnotourisme y est très populaire, des séjours sont proposés pour découvrir la transition agroécologique du vignoble et la dimension culturelle et patrimoniale des vins. Cette démarche de préservation du terroir et de son environnement ouvre aux vins de Bergerac Duras de nouveaux circuits de distribution en plus du réseau CHR traditionnel : les circuits courts, mais aussi des lieux culturels (musées, bibliothèques, etc.).

Tableau 6.4. Résumé des hypothèses formant le scénario de la filière viti-vinicole sans pesticides chimiques en Bergerac Duras en 2050

Chaîne de valeur	Les vins de Bergerac Duras et les nouvelles productions agricoles issues de la diversification sont reconnus par les consommateurs pour leurs qualités gustatives, environnementales ainsi que leur contribution au patrimoine culturel du territoire grâce au label « Réserve de biosphère » de l'Unesco.
Structures d'exploitation	Un contrat social lie les acteurs du Bergerac Duras – viticulteurs, vigneron, coopératives, collectivités, associations de riverains, industriels, etc. – autour d'un même projet de territoire dans lequel les viticulteurs sont rémunérés pour les services rendus. La diversité des exploitations viticoles est maintenue sur le territoire avec des vigneron indépendants et des coopératives.

Systèmes de culture	Des mosaïques de culture et d'habitats semi-naturels créent des paysages complexes, résilients, où les bioagresseurs sont régulés sans recours aux pesticides chimiques. Ces paysages sont totalement intégrés au territoire du Bergerac Duras. Les interventions sur la vigne sont réduites au minimum. Les cépages utilisés sont diversifiés.
Agroéquipements et technologies numériques	Les équipements adaptés à ces paysages complexes sont co-crésés avec les fournisseurs, les chercheurs, les viticulteurs, et respectent les critères sociaux et environnementaux du cahier des charges de l'AOC. Ils sont partagés entre viticulteurs voisins, tout comme les outils et les données de surveillance (climat, bioagresseurs, morphologie) des paysages. Ils facilitent le travail des viticulteurs et réduisent les risques pour les utilisateurs.

■ La trajectoire de transition vers une filière viti-vinicole sans pesticides chimiques en Bergerac Duras d'ici à 2050

Principaux jalons et actions nécessaires à la transition

Plusieurs jalons concernent la mise en place de nouvelles formes de gouvernance autour des acteurs du territoire. Comme prérequis, il se dégage une nécessité de fédérer les acteurs autour de la construction d'un projet de territoire. Tout au long de la transition, il y a un fort besoin de coordination pour déployer le projet. Différents jalons sont donc liés à l'évolution de la gouvernance vers une gouvernance participative incluant les différents acteurs du territoire. Afin de constituer ces instances de gouvernance, et ainsi permettre une gestion partagée du territoire, du foncier agricole, avec une structure juridique dédiée, plusieurs actions sont proposées, notamment la création d'une convention citoyenne pour construire un projet commun et suivre l'ensemble de la transition.

Ces nouvelles formes de gouvernance permettent de faciliter la mutualisation : des outils, des données – notamment de surveillance des paysages –, des moyens de financement par la création d'un fonds monétaire pour financer la transition de la filière.

La certification a une place importante dans la transition. Elle nécessite une révision des cahiers des charges existants encadrant les appellations d'origine, AOP et IGP, en mettant à contribution l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO), pour intégrer notamment des critères environnementaux et de préservation de la biodiversité. Cette certification aboutit à l'obtention du label « Réserve de biosphère » délivré par l'Unesco.

Il faut définir, assez tôt dans la transition, la gamme des produits, c'est-à-dire de vins du territoire, souhaitée en 2050, en anticipant les changements de pratiques, le changement climatique et ses conséquences, ainsi que les évolutions des attentes des consommateurs. Ceci va notamment influencer les travaux de recherche sur les choix variétaux. Pour valider les cépages utilisés, il faudra réaliser des tests d'élaboration de vins avec les cépages résistants sélectionnés ainsi que des tests auprès des consommateurs pour vérifier l'acceptabilité des vins élaborés. Il sera également nécessaire d'adapter les systèmes de conduite en fonction de cépages sélectionnés. Ensuite, il conviendra de mener des actions de communication auprès des consommateurs pour valoriser le label « Réserve

de biosphère ». Enfin, des actions de communication auprès des professionnels de la filière et de ses marchés seront mises en œuvre par l'intermédiaire des salons professionnels et des réseaux sociaux pour mettre en avant le label et les qualités des vins.

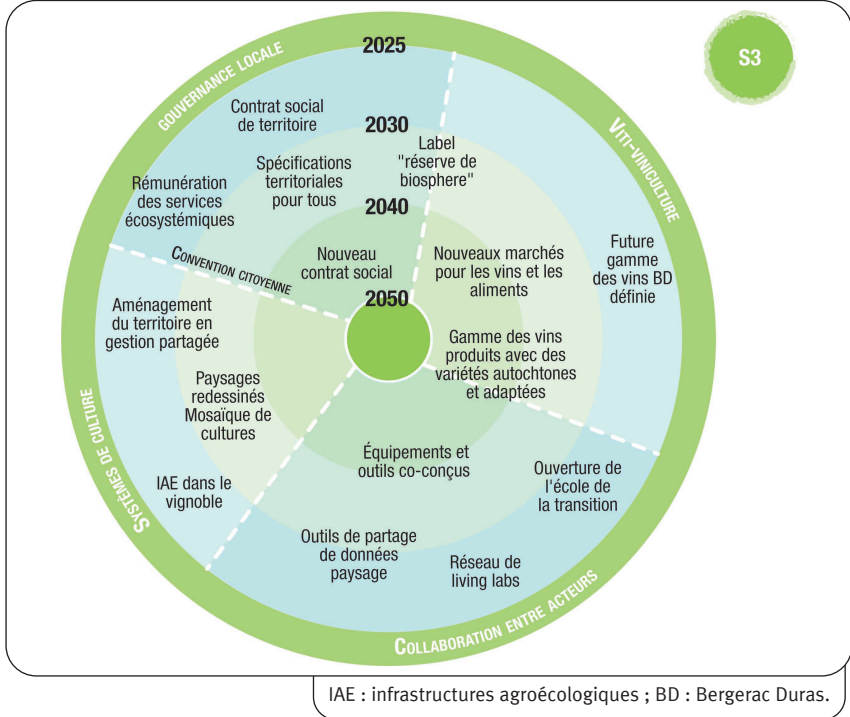
Au niveau du vignoble, la transition repose beaucoup sur l'expérimentation et la co-construction. Plusieurs actions sont proposées dans ce sens, pour réaliser un état des lieux des pratiques existantes, les mettre en commun, expérimenter, rassembler les résultats, les diffuser sur les réseaux existants (Dephy, VitiRev), créer des ateliers de fabrication collaboratifs (Fab Lab) pour co-construire des solutions, former, motiver les opérateurs sur la base des bons résultats obtenus et généraliser les pratiques. Les organismes de recherche ont un grand rôle à jouer dans la transition, pour accompagner l'expérimentation et pour faire du transfert de connaissances.

Un jalon consiste à créer, dès le début de la transition, « l'école de la transition », dans laquelle une formation délivre un certificat spécialisé « Biodiversité » pour la viticulture. C'est une école ouverte aux lycées agricoles, aux expérimentateurs, aux consommateurs ainsi qu'aux riverains. La formation est obligatoire pour les viticulteurs et les travailleurs viticoles ; elle aboutit à une certification et permet aussi la validation d'acquis. Un référentiel métier du viticulteur et de la biodiversité, en lien avec l'école de la transition et le label « Réserve de biosphère » est créé.

Au final, peu de solutions techniques – ou de besoins de solutions techniques – ont été identifiées. Ce sont surtout des solutions organisationnelles, de formation, de transfert, de soutien à la transition ainsi que de répartition de la valeur qui ont été proposées.

La trajectoire de transition et son récit résumé

Figure 6.5. Diagramme présentant les principales étapes de la trajectoire de transition vers la filière viticole sans pesticides chimiques en Bergerac Duras d'ici 2050



La transition débute par la validation du projet de transition agroécologique par les acteurs locaux, suivie par la mise en place d'une gouvernance participative autour d'un contrat social de territoire, intégrant les riverains. Elle organise la transition, l'aménagement du territoire, et le financement au travers de la rémunération des services écosystémiques. Les acteurs coopèrent de plus en plus, partagent leurs connaissances, leurs pratiques, co-développent et testent les solutions adaptées à leurs besoins, dans le but commun d'obtenir la certification « Réserve de biosphère » pour le territoire. Cette certification ouvre de nouveaux marchés pour les vins de Bergerac Duras et des aliments issus de la diversification des cultures.

7. Les enseignements des scénarios

Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouël C., Meunier C.

Ce chapitre présente les principales conclusions de l'étude prospective résultant de deux années de travail de l'équipe projet en relation avec le comité d'experts européen et les groupes d'experts thématiques.

Une première partie analyse les forces, faiblesses, opportunités et menaces des trois scénarios dans leur globalité, afin de mettre en évidence leurs principales caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients, et de les comparer. Dans une seconde partie est proposée une analyse transversale des systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050, de leur résilience au changement climatique, mais aussi des besoins de recherche pour parvenir à une protection efficace des cultures sans pesticides chimiques d'ici 2050. Une troisième partie synthétise les enseignements tirés de la quantification (chapitre 5) des impacts des trois scénarios sur l'utilisation des terres, la production, le commerce et les émissions de GES. Une quatrième partie résume les conditions de la transition vers une agriculture sans pesticides chimiques. L'examen des trois trajectoires de transition vers une agriculture européenne sans pesticides chimiques d'ici à 2050 (chapitre 4) permet de dégager les éléments robustes qui définissent les étapes et les actions nécessaires à une transition. Le chapitre se clôt par une synthèse des messages clés de cette étude prospective.

1. Forces et faiblesses des trois scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques

Pour comparer les trois scénarios, une analyse transversale identifiant les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces (dite analyse SWOT, pour *strengths, weaknesses, opportunities and threats* en anglais) des scénarios a été menée avec les membres du comité d'experts européen de la prospective. Il s'est agi pour chaque scénario de définir les principaux avantages à sa réalisation future (en interne – les forces du scénario –, et à l'extérieur – les opportunités pour le scénario) et les obstacles à surmonter pour y parvenir (en interne – les faiblesses du scénario –, et à l'extérieur – les menaces pour le scénario).

Le résultat de cette analyse est présenté ci-dessous sous une forme synthétique et sous la forme d'un tableau détaillé (tableau 7.1).

La principale force du scénario 1 « Marché global » est qu'il établit un marché alimentaire mondial sans pesticides, ce qui signifie que le même objectif est partagé par tous les acteurs et mis en œuvre dans tous les États européens. Les principales technologies et les connaissances nécessaires à la réalisation de ce scénario (numérique, infrastructures pour les données) sont déjà en partie disponibles ou en cours de développement, et les entreprises mondiales sont déjà en place. De plus, la mise en œuvre du scénario n'implique pas de rupture dans le régime alimentaire des consommateurs et dans l'organisation des systèmes alimentaires. Elle nécessite cependant des développements technologiques importants, y compris dans les domaines du numérique, des agroéquipements (robotisation), des capteurs et des infrastructures de gestion des données, qui sont en cohérence avec les politiques d'innovation actuellement mises en œuvre en Europe. Les principales faiblesses du scénario sont qu'il pourrait impliquer une réduction du contrôle public sur le système alimentaire (du fait de la privatisation des standards) et nécessiterait des investissements massifs de la part des agriculteurs pour acquérir les technologies ; ces derniers pourraient avoir des difficultés à mobiliser les capitaux nécessaires et à accroître leurs investissements. Ce scénario soulève également la question de la propriété des données et du capital par des entreprises privées externes au secteur agricole, et l'enjeu de la dépendance de cette trajectoire technologique à l'égard des ressources énergétiques et minières. Pour ces différentes raisons, ce scénario risque d'être très sensible aux crises : énergétique, économique, géopolitique et climatique. Dans l'ensemble, le scénario 1 pourrait conduire à une diminution du nombre d'agriculteurs en Europe et à un agrandissement des exploitations, ainsi qu'à une diminution des interactions entre les agriculteurs et les habitants des territoires.

Le scénario 2 « Microbiomes sains » repose sur la gestion du microbiome. C'est un point fort, car il s'agit actuellement d'un domaine très dynamique en ce qui concerne la recherche et l'éducation. Il s'agit également d'un sujet d'intérêt pour le public, en raison des relations entre les microbiomes et la santé humaine, les aliments sains et les régimes alimentaires sains, avec un potentiel de développement de nouveaux marchés. Un autre point fort de ce scénario est l'inclusion de la santé des sols, qui est essentielle pour la durabilité. Le développement du scénario 2 semble cohérent, du fait de son approche holistique, avec les orientations des politiques publiques européennes comme la stratégie « De la ferme à la table » du Pacte vert européen. Le principal défi du scénario est que, bien que très dynamique, ce domaine scientifique et les connaissances qui y sont liées sont encore limités, en particulier en ce qui concerne le continuum des microbiomes du champ à l'assiette. Par conséquent, il faudra du temps et des ressources pour acquérir les connaissances nécessaires et proposer des solutions innovantes d'ici 2050. En outre, dans ce scénario, les systèmes coopératifs pourraient ne pas être prêts et ne pas s'engager à jouer un rôle central dans la transition vers le paradigme de l'holobionte. Bien que le scénario 2 repose principalement sur la modulation du microbiome par les pratiques agricoles, le choix des cultures et les amendements organiques, il pourrait être interprété comme dépendant fortement

des intrants biologiques, à savoir des solutions de biocontrôle et de biostimulation telles que les micro-organismes, ce qui finirait par créer une nouvelle dépendance à l'égard de ce nouveau type d'intrants, au lieu de permettre une reconception des systèmes de culture et des stratégies de protection des cultures.

Le scénario 3 « Paysages emboîtés » répond aux attentes de la société civile en matière de protection de l'environnement et de santé humaine. Un autre point fort de ce scénario est qu'il promeut fortement les principes de l'agroécologie qui se développent de manière significative en Europe, tant en matière de connaissances scientifiques qu'en ce qui concerne les pratiques (si l'on considère par exemple le développement sur le long terme de l'agriculture biologique). De plus, le contexte actuel, marqué par une augmentation des coûts de l'énergie et des prix des intrants, favorise les systèmes à bas niveau d'intrants basés sur des régulations biologiques. Le scénario 3 vise à relocaliser les systèmes alimentaires en les découplant des marchés alimentaires mondiaux. Ce scénario présente un fort potentiel pour contribuer à relever les défis du changement climatique, et notamment l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de neutralité carbone. Il pourrait également permettre de préserver la santé humaine et les écosystèmes, y compris en restaurant la biodiversité. Il est conforme à l'évolution de la politique de l'UE (Pacte vert, loi sur la restauration de la nature). L'un des principaux défis du scénario 3 est qu'il nécessite une coordination forte et multiacteur entre les agriculteurs et les diverses parties prenantes du territoire pour reconcevoir et gérer la complexité des paysages, à différents niveaux. Il nécessite également que les acteurs, tels que les agriculteurs et les décideurs publics, réfléchissent et engagent des actions de long terme à grande échelle. Enfin, le scénario exige des agriculteurs qu'ils inversent leur dynamique de spécialisation, en mettant en œuvre une dé-spécialisation, et qu'ils intègrent différentes tâches et activités liées à la diversification des cultures ou à la gestion des habitats semi-naturels. C'est notamment pour ces raisons que ce scénario nécessite un apprentissage collectif et un soutien aux agriculteurs et à la chaîne de valeur alimentaire dans la phase d'expérimentation de la transition. Il peut y avoir à l'échelle européenne des différences régionales dans les capacités des pays à investir et à soutenir cette transition. Ce scénario dépend aussi fortement de la volonté des consommateurs de modifier leur régime alimentaire.

Tableau 7.1. Forces, faiblesses, menaces et opportunités des trois scénarios européens d'agriculture sans pesticides chimiques en 2050

Scénario	S1 Marché global	S2 Microbiomes sains	S3 Paysages emboîtés
Forces	Développement global autour du même objectif (à savoir un marché alimentaire sans pesticides chimiques) Disponibilité des technologies : numérique, connaissances, infrastructures de données Évolution en continuité pour les entreprises globales de l'agroalimentaire Pas de grands changements dans les régimes alimentaires des consommateurs	Dynamiques en cours d'éducation et de recherche sur les processus microbiens et la gestion des microbiomes Prend appui sur la santé du sol qui est un élément clé de la durabilité	Popularité croissante des principes de l'agroécologie et des approches durable, participative et systémique Attentes des citoyens sur la santé environnementale (exemple, pétition « Sauvons les abeilles et les agriculteurs ») Pourrait bénéficier des avancées scientifiques et des connaissances déjà existantes
Faiblesses	Réduction du contrôle public sur le système alimentaire Peu de preuve de la capacité des technologies numériques à accompagner la transition vers des systèmes sans pesticides Dépendance accrue à un petit nombre d'écosystèmes sous pression Difficulté de mobilisation du capital par les agriculteurs Appropriation des données par des entreprises privées Réduction des interactions des agriculteurs avec les entités biologiques (animales ou végétales) et aussi avec les résidents des territoires	Manque de connaissances sur les microbiomes du sol à l'assiette, temps et ressources limités pour l'acquisition de ces connaissances par des recherches sur les micro-organismes et l'holobionte Intérêt du système coopératif pour mener une telle transition ? Pourrait être interprété comme une approche de substitution des pesticides chimiques par des intrants biologiques Pourrait rencontrer des difficultés de compréhension de côté du grand public	Besoin d'une forte coordination entre agriculteurs et autres acteurs du territoire Dépendance actuelle des agriculteurs aux pesticides chimiques Résistance au changement des acteurs À l'opposé des tendances actuelles de spécialisation des structures agricoles et d'augmentation de la taille des parcelles Formation nécessaire à la gestion de la complexité et de l'adaptabilité, et notamment des activités multitâches Besoin d'une planification à long terme construite par agriculteurs et décideurs publics
Menaces	Forte sensibilité aux crises économiques ou géopolitiques Disparition accélérée des agriculteurs sous l'effet de la généralisation des robots	Limite de la protection des cultures pour les plantes sans mycorhizes Impact négatif sur le sol lié l'utilisation d'agroéquipements	Résistance au changement des consommateurs (changement de régime alimentaire) Lobbying des entreprises

Scénario	S1 Marché global	S2 Microbiomes sains	S3 Paysages emboîtés
Menaces	Et si les investisseurs n'étaient pas intéressés ?	Acceptabilité limitée du fait des enjeux sanitaires perçus Difficulté de la transformation de la chaîne de valeur Difficulté de mise en œuvre du paradigme de l'holobionte dans la protection des cultures Mise en place du scénario menacée par la contamination existante des sols	Manque de preuve de l'efficacité de l'agroécologie Crainte d'une forte réduction des rendements Fortes différences régionales dans la capacité financière à investir dans la transition Compétition entre régions Manque d'accompagnement par des politiques publiques
Opportunités	Aligné avec la vision actuelle des décideurs publics du progrès technique Cohérent avec le plan stratégique français et ses priorités (numérique, robotisation, données, génétique) Opportunité pour les investisseurs externes Prise en compte de la santé de la plante	Intérêt fort du grand public pour les microbiomes, la santé humaine et une alimentation saine Opportunité pour des innovations sur les produits Soutien par les décideurs publics (cohérent avec vision du progrès technique) Cohérent avec le Pacte vert européen et son approche holistique	Réduction possible au moyen de l'agroécologie des émissions de gaz à effet de serre, préservation de la santé humaine, amélioration du bien-être animal, et développement de la résilience face au changement climatique Limites de l'efficacité des produits agrochimiques face à l'accroissement des coûts de l'énergie et face à une crise géopolitique Cohérent avec le Pacte vert et les politiques associées (loi de restauration de la nature) Adaptabilité des systèmes alimentaires locaux Cohérent avec un découplage croissant des marchés alimentaires globaux

2. Une analyse transversale des systèmes de culture dans les trois scénarios

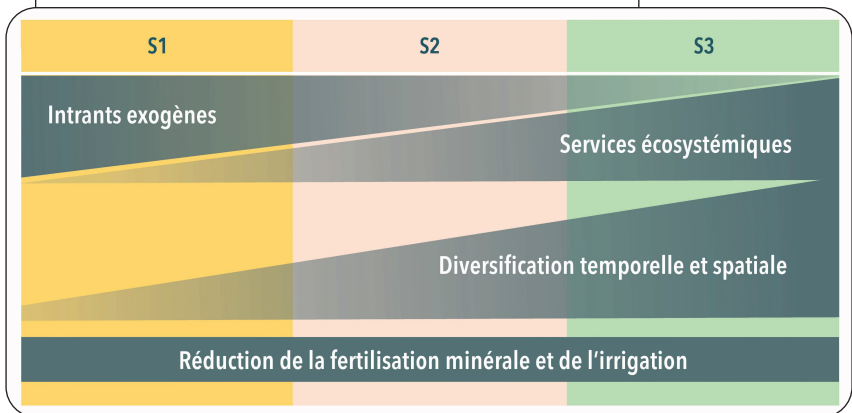
L'étude prospective nous fournit des informations spécifiques sur les systèmes de culture sans pesticides que nous synthétisons ci-dessous en présentant une analyse comparative des systèmes de culture dans les trois scénarios, en évaluant la résilience de ces systèmes de culture au changement climatique et en présentant les besoins en matière de recherche pour parvenir à une protection efficace des cultures sans pesticides chimiques en 2050.

■ Une comparaison des systèmes de culture dans les trois scénarios au travers de trois gradients d'intensité

La complémentarité des trois hypothèses de protection des cultures dans chaque scénario doit être envisagée en fonction du système de culture et de la chaîne de valeur alimentaire dans laquelle il est inséré. En effet, c'est le type de système de culture qui va déterminer les modalités de suivi des bioagresseurs et les objectifs de la sélection variétale, en fonction du contexte local.

Les systèmes de culture en 2050 peuvent être caractérisés selon différents gradients d'intensité caractérisés par l'usage d'intrants exogènes (produits de biocontrôle, stimulateurs de défense des plantes, engrais), la mobilisation de services écosystémiques, ainsi que le niveau de diversification spatiale et temporelle (figure 7.1). Les trois scénarios intègrent une réduction de l'utilisation d'engrais minéraux et de l'irrigation afin de réduire la pression des bioagresseurs (champignons, adventices, ravageurs) sur les cultures.

Figure 7.1. Les caractéristiques des systèmes de culture dans chaque scénario



La figure 7.1 permet une analyse transversale des systèmes de culture dans les trois scénarios. D'un côté, dans le scénario S1 « Marché global », les systèmes de culture reçoivent beaucoup d'intrants exogènes, les cultures sont assez peu diversifiées et il y a peu de services écosystémiques. De l'autre côté, dans le scénario S3 « Paysages emboîtés », les systèmes de culture utilisent peu d'intrants exogènes et mobilisent un niveau élevé de diversification et de services écosystémiques. Cela montre qu'en matière d'intrants exogènes, de services des écosystèmes et de niveau de diversification, plusieurs types de transformation des systèmes agricoles sont possibles, chacun ayant des bénéfices et des inconvénients (qui ont été développés dans la section précédente, ci-dessus).

Encadré 7.1. En quoi les systèmes de culture sans pesticides en 2050 diffèrent des systèmes de culture en agriculture biologique ?

Les principes de l'agriculture biologique, qui par définition excluent l'utilisation de pesticides de synthèse, fournissent des informations et des pratiques concrètes qui ont contribué à façonner les différents scénarios sans pesticides chimiques, et en particulier les pratiques de diversification temporelle et spatiale des cultures. Toutefois, l'agriculture biologique comprend, outre les contraintes liées à l'utilisation de pesticides, d'autres critères comme la fertilisation organique et l'exclusion des engrais de synthèse. Les systèmes de culture sans pesticides chimiques développés dans cette prospective peuvent mobiliser des engrais de synthèse à condition que leur usage reste cohérent avec les principes de protection des cultures appliqués dans le scénario.

■ La résilience des systèmes de culture dans les trois scénarios

Comme le montre la section 2 du chapitre 2 (p. 86-92), la plupart des études soulignent que le risque lié aux bioagresseurs (insectes, pathogènes et adventices) augmentera en 2050 dans les systèmes de culture sous l'effet du changement climatique, en particulier dans les régions actuellement les plus froides, ainsi que dans les régions tempérées et subtropicales. Les simulations montrent que tous les climats et écosystèmes seront touchés. Ils seront affectés non seulement par l'évolution des conditions bioclimatiques moyennes (notamment la température et la concentration en CO₂), qui sont prévisibles et tendancielle depuis plusieurs décennies, mais aussi par la survenue de plus en plus fréquente d'événements extrêmes et d'aléas climatiques qui sont aujourd'hui imprévisibles et rendent très incertaines les prévisions locales et régionales des différents facteurs climatiques. Par conséquent, la nature et l'ampleur de l'impact du changement climatique sur les bioagresseurs et leurs interactions avec les plantes hôtes varieront en fonction de la capacité d'adaptation des systèmes de production et des écosystèmes naturels.

Le changement climatique aura une incidence sur la pression exercée par les insectes ravageurs des cultures, dont la physiologie et les dynamiques sont principalement influencées par la température, mais aussi par l'humidité et par le vent. Il aura également une incidence sur les pathogènes dont l'ensemble du cycle de vie est fortement déterminé par la température et l'humidité. La pression des adventices sera aussi modifiée puisque leur croissance et leur développement dépendent, comme pour les cultures, de la température, des précipitations et des concentrations en CO₂. Le changement climatique impliquera aussi des évolutions dans la répartition géographique des bioagresseurs et des cultures en Europe, avec un risque accru d'introduction de bioagresseurs invasifs, ainsi que des synchronies de développement entre les bioagresseurs et leurs plantes hôtes. Les effets biophysiques du changement climatique sur les bioagresseurs et leurs interactions avec les plantes-hôtes doivent faire l'objet de recherches supplémentaires.

Compte tenu de la complexité des systèmes de culture, et plus largement des socioécosystèmes, ainsi que des incertitudes sur les effets de long terme du changement climatique, il semble essentiel de concentrer les efforts sur le renforcement de la résilience des systèmes agricoles.

Urruty *et al.* (2016) en s'appuyant sur les travaux de Darnhofer (2010) définissent la résilience comme la capacité d'un système à absorber un changement et à anticiper une perturbation future. La capacité de résilience peut être appréciée par (i) la robustesse qui est la capacité intrinsèque d'un système à supporter les stress et les chocs non anticipés, et (ii) l'adaptabilité qui est la capacité d'un système à modifier la composition des intrants, la production, les modes de commercialisation et la gestion du risque en réponse aux stress et aux chocs, mais sans modifier sa structure et ses processus de rétroaction (Meuwissen *et al.*, 2019, basé sur Holling *et al.*, 2002).

Le changement climatique oblige déjà à modifier les stratégies de protection des plantes, et cette tendance devrait s'accroître. Confrontée au changement climatique, la gestion des bioagresseurs devra évoluer vers des approches globales au niveau de l'exploitation, du paysage et du territoire, qui renforcent la résilience des systèmes. Pour cela, les activités de surveillance des bioagresseurs, de la santé des plantes et de facteurs environnementaux aux niveaux national, régional et international seront essentielles et devront être renforcées pour mettre en œuvre des mesures prophylactiques et anticiper les menaces sur la santé des plantes.

La résilience des systèmes de culture des trois scénarios face aux bioagresseurs dans le contexte du changement climatique à l'horizon 2050 peut être évaluée au travers de leur robustesse et de leur adaptabilité. Les éléments présentés précédemment d'une part concernant les effets du changement climatique sur les bioagresseurs et les interactions entre bioagresseurs et cultures hôtes, ainsi que concernant la résilience des systèmes de culture (chapitre 2, section 2), et d'autre part sur les stratégies de protection des cultures (chapitre 2, section 3) permettent d'identifier, pour chacun des trois scénarios de cette étude prospective, les principaux facteurs de robustesse et d'adaptabilité des systèmes de culture et plus largement des systèmes de production aux risques liés aux bioagresseurs dans un contexte de changement climatique (tableau 7.2).

Tableau 7.2. Facteurs de robustesse et d'adaptabilité des systèmes de culture dans les trois scénarios (S1, S2, S3)

	Robustesse	Adaptabilité
S1	Sélection végétale visant à produire des cultures (notamment associations d'espèces et mélanges variétaux) plus tolérantes ou résistantes aux stress et aux chocs	Fourniture exogène de biostimulants, de stimulateurs de défense des plantes, de communautés microbiennes au sol et aux plantes
S2	Diversité biologique et fonctionnelle des microbiomes renforcée, afin de mobiliser le recrutement par la plante cultivée de micro-organismes fonctionnels pour faire face aux perturbations biotiques et abiotiques Suppression des agents pathogènes du sol par des micro-organismes de la rhizosphère Sélection végétale visant à accroître les interactions bénéfiques entre plantes et micro-organismes et leurs processus de coévolution	Adaptation des pratiques culturales afin de moduler les structures et les fonctions du microbiome dans l'espace et dans le temps Adaptation locale et temporelle par la fourniture exogène ou endogène d'intrants microbiens
S3	Accroissement de la diversité et de la redondance fonctionnelles dans les paysages (diversité spatiale et temporelle, complexité, connectivité) afin de favoriser les services de régulation biologique, et de stabiliser la production en réponse aux stress et aux chocs Sélection végétale adaptée à la diversification (notamment association de cultures) et aux conditions pédologiques et climatiques locales Modifications des pratiques culturales et des paysages pour créer des discontinuités pour les bioagresseurs et des continuités pour les auxiliaires	Changement au cours du temps de la mosaïque des cultures et des pratiques culturales afin d'anticiper les risques de développement de bioagresseurs Anticipation des stress et des chocs grâce à des systèmes de surveillance (des bioagresseurs, des plantes et des conditions météorologiques)

■ Les besoins de recherche pour les systèmes de culture dans les trois scénarios à l'horizon 2050

Les trois microscénarios de systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050 – « Renforcement de l'immunité des plantes cultivées », « Gestion de l'holobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions hôte-microbiote », « Conception de paysages complexes et diversifiés adaptés aux contextes locaux et à leur évolution » – ont été définis en s'appuyant sur les connaissances actuelles ainsi que les programmes de recherche en cours et à venir. Pour chacune des hypothèses disruptives de protection des cultures (chapitre 2, section 3), les connaissances et les techniques existantes ont été évaluées, et les connaissances manquantes ont été identifiées, durant un atelier impliquant des chercheurs (tableau A.11) engagés dans les différents projets du programme de recherche prioritaire « Cultiver et protéger les cultures autrement ». Au cours d'un atelier d'une journée, ceux-ci ont évalué les hypothèses de protection des cultures sans pesticides chimiques par rapport aux connaissances actuelles et aux besoins en matière de recherche. La synthèse des résultats de l'atelier est présentée dans le tableau 7.3.

■ Les besoins de recherche pour le microscénario de systèmes de culture « Renforcement de l'immunité des plantes cultivées »

Les experts ont souligné que, dans cette hypothèse de protection des cultures, les connaissances existantes des mécanismes d'action moléculaires et sur les résistances partielles aux bioagresseurs pourraient permettre de développer des solutions basées sur des stimulateurs de défense des plantes, des plantes de service (telles que les plantes compagnes, des cultures associées, des paillis vivants ou morts) ou des flashes UV-C.

Les recherches futures devront compléter ces connaissances actuelles, notamment sur les interactions entre les différents leviers pour stimuler l'immunité des plantes, sur l'identification des marqueurs d'immunité des plantes, ainsi que développer une cartographie des gènes de résistance aux principaux bioagresseurs pour une large gamme d'espèces végétales.

■ Les besoins de recherche pour le microscénario de systèmes de culture « Gestion de l'holobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions hôte-microbiote »

Cette hypothèse de protection des cultures est soutenue par les connaissances existantes sur la mycorhization et les outils d'évaluation de la diversité génétique des micro-organismes et de leur détection.

Cependant, elle nécessite de développer des connaissances pour mieux comprendre, dans un premier temps, le lien entre une structure particulière d'une communauté microbienne et ses caractéristiques fonctionnelles, mais aussi d'identifier les communautés microbiennes importantes pour les différentes cultures et leur dynamique. Cette hypothèse de protection des cultures nécessite également la création d'un outil de suivi du microbiome et requiert de déterminer des moyens de moduler les micro-organismes du sol (notamment au travers des pratiques culturales).

■ Les besoins de recherche pour le microscénario de systèmes de culture « Conception de paysages complexes et diversifiés adaptés aux contextes locaux et à leur évolution »

Il existe déjà un vaste corpus de connaissances permettant d'étayer cette hypothèse sur les principes et les mécanismes liés à la diversification des cultures et à la conception paysagère, à l'échelle de la parcelle et du territoire. En outre, plusieurs projets de recherche sont en cours pour comprendre comment les mettre en œuvre.

Cependant, cette hypothèse nécessite de développer des outils de détection (tels que des capteurs) et de modélisation (y compris l'intelligence artificielle) pour anticiper les impacts quantitatifs des bioagresseurs sur les cultures, ainsi que la mise au point de solutions pour les plantes pérennes.

En plus des besoins de recherche pour une protection des cultures sans pesticides chimiques d'ici 2050 identifiés ici, des recherches complémentaires sont nécessaires sur la manière de conduire la transition des systèmes de culture, des structures agricoles, des cadres réglementaires et des politiques publiques, et l'adaptation de la chaîne de valeur alimentaire, notamment.

Tableau 7.3. Connaissances scientifiques existantes, techniques disponibles et connaissances manquantes pour la mise en œuvre des trois microscénarios de systèmes de culture sans pesticides chimiques en 2050

Microscénario de systèmes de culture	Renforcement de l'immunité des plantes cultivées	Gestion de l'holobionte des plantes cultivées en renforçant les interactions hôte-microbiote	Conception de paysages complexes et diversifiés adaptés aux contextes locaux et à leur évolution
Connaissances scientifiques existantes	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissances sur les mécanismes moléculaires d'action des substances de défense des plantes • Connaissances sur les mécanismes de résistance partielle aux bioagresseurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance sur les mécanismes de la mycorhization et les micro-organismes impliqués dans le cycle de l'azote (groupes fonctionnels capables de réaliser la nitrification et la dénitrification) • Outils de mesure de la diversité biologique : techniques de <i>barcoding</i> ou de métagénomique • Outils de détection des micro-organismes dans les différents compartiments (eau, sol et air) 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissances développées sur les principes et les mécanismes liés à la diversification et la conception des paysages à l'échelle des parcelles, du paysage et du territoire • Modèles de génétique d'association (GWAS) • Modèles écophysologiques pour l'étude des mécanismes d'interaction entre les plantes • Distinguer dans l'approche les plantes pérennes des plantes annuelles
Techniques mobilisables ou en expérimentation	<ul style="list-style-type: none"> • Introduction de plantes de service, en maraîchage en particulier, ou pour lutter contre les nématodes chez le sorgho fourrager • Apports de stimulateurs de défense des plantes (SDP) • Apports de flashes UV-C (la start-up UV Boosting réalise des essais sur la fraise et la vigne) • Stimulation de l'immunité des plantes en favorisant les interactions entre les leviers stimulant l'immunité des plantes (par exemple, entre les SDP et les QTL, c'est-à-dire les <i>quantitative trait loci</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Outils disponibles pour détecter, isoler et cultiver des micro-organismes • Techniques disponibles d'amplification locale et de réimplantation des micro-organismes • Techniques pour obtenir des communautés synthétiques microbiennes (SynCom) en cours d'expérimentation • Mélanges commerciaux de micro-organismes vivants. Par exemple, mélange de champignons (<i>Rhizopus</i>) et de Streptomycètes (<i>Bacillus</i>) avec un enjeu d'homologation pour effet phytoprotecteur • Expérimentations sur relations entre cortèges microbiens et cultures de blé-colza 	<ul style="list-style-type: none"> • Outils pour raccourcir le temps de production des plantes pérennes, particulièrement en viticulture pour surgreffer plutôt que replanter • Ateliers de co-conception d'idéotypes ou de mélanges • Outil d'aide à la décision pour définir des associations de plantes • Outils utilisables en sélection pour favoriser la diversification (par exemple, les marqueurs moléculaires) • Coordination des filières aval à l'échelle des paysages pour commercialiser les produits issus de la diversité culturale (par exemple, l'innovation couplée pour les cultures associées) • Nombreux travaux sur la diversification des cultures (rotations, cultures associées), mais peu de travaux sur la diversification des paysages

<p>Connaissances manquantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compléter les connaissances sur les interactions entre les leviers qui stimulent l'immunité des plantes, notamment sur les effets additifs ou les effets antagonistes • Établir une cartographie des gènes de résistance aux principaux bioagresseurs • Identifier les marqueurs de l'immunité des plantes • Acceptabilité des solutions SDP (et biostimulants) auprès des utilisateurs et de la société 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprendre le lien entre la structure d'une communauté microbienne et les fonctions que cet ensemble réalise • Construire des outils de suivi des micro-organismes du sol dans le temps et dans l'espace • Suivre et comprendre l'impact des inoculations sur le milieu et sur la culture suivante dans la rotation • Connaître les cortèges microbiens importants pour les différentes cultures • Identifier les bonnes combinaisons de micro-organismes à inoculer, sans effets antagonistes • Étudier les relations entre cortèges microbiens et cultures à l'échelle nationale • Cartographier les microbiotes des sols et leur dynamique 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantifier les effets attendus de la diversification des cultures et de la reconception paysagère (dont habitats semi-naturels) afin de convaincre les agriculteurs • Comprendre les mécanismes d'interactions plantes-plantes ainsi que les traits et gènes associés • Identifier les solutions pour l'arboriculture • Mieux comprendre l'évolution du modèle de gouvernance de l'exploitation, ses modes de financement, de prise de décision, etc. • Comprendre comment faire travailler ensemble les différents acteurs à l'intérieur d'un même paysage • Comprendre comment organiser la transition entre acteurs (intégrant les politiques publiques et les changements chez les consommateurs)
<p>Exemples de recherches en cours</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cap Zero Phyto (adaptation du concept d'immunité écologique à la protection des cultures : Rosaceae et Solanaceae) • Pherosensor (détection précoce des insectes ravageurs à l'aide de capteurs olfactifs utilisant des récepteurs phéromonaux) • Invite (<i>Innovations in plant variety testing in Europe</i>)^a 	<ul style="list-style-type: none"> • Deep impact (analyse des interactions plante-microbiote pour promouvoir la défense des plantes aux bioagresseurs) • Sucseed (mettre fin à l'utilisation des pesticides sur les semences et proposer des solutions alternatives) • Métaprogramme Holoflux (holobiontes et flux microbiens au sein des systèmes agri-alimentaires) • Circles (<i>Unlocking the potential of microbiomes for sustainable food production</i>)^b 	<ul style="list-style-type: none"> • Be-creative (co-conception de territoires sans pesticides) • Mobidiv (mobiliser et sélectionner la diversité cultivée intraspécifique et interspécifique pour un changement systémique vers une agriculture sans pesticides) • Specifics (conception de systèmes de culture sans pesticides et riches en légumineuses à graine) • Vitae (cultiver la vigne sans pesticides : vers des socioécosystèmes viticoles agroécologiques) • Projets Horizon Europe : Diverimpacts, Diverfarming, True, Legvalue, Remix, Diversify

a Le projet Invite vise à améliorer l'efficacité de l'évaluation variétale et les informations dont disposent les utilisateurs sur les performances des variétés dans diverses conditions de production. <https://irhs.angers-nantes.hub.inrae.fr/recherche/valorisation-de-la-diversite-des-pomoides/projets-partenariats/projet-invite>

b Le projet Circles vise à libérer le potentiel des microbiomes pour une production alimentaire durable. <https://circlesproject.eu/>

3. Les enseignements des simulations des impacts des scénarios sur la production agricole et le commerce, les changements d'usage des terres et les émissions de gaz à effet de serre en Europe

Sur la base des simulations de l'impact des scénarios présentés au chapitre 5, nous proposons ci-dessous une évaluation comparative des trois scénarios, avec leurs principaux enseignements.

Les scénarios ont des impacts contrastés sur la production agricole européenne. Par rapport à 2010, la production domestique européenne en calories varie de -5% à $+12\%$ en 2050, selon les scénarios et l'hypothèse retenue sur les rendements, à savoir limite basse (lb) ou limite haute de rendement (lh).

De plus, la composition de la production varie d'un scénario à l'autre, car l'agriculture européenne est intégrée à des systèmes alimentaires complètement différents dans ces trois scénarios. Étant donné notre approche de modélisation, la composition de la production est étroitement liée à celle des régimes alimentaires. Il en résulte que si la composition de la production en 2050 ne se distingue pas fondamentalement de celle observée en 2010 dans le scénario S1, elle est radicalement différente dans les scénarios S2 et S3. En particulier, comme les régimes alimentaires dans les scénarios S2 et S3 sont moins riches en produits animaux, la production animale européenne diminue sensiblement, de même que celle d'aliments pour animaux, y compris les fourrages et l'herbe des prairies permanentes. La superficie consacrée aux prairies permanentes est en net recul dans le S2 (-28% en 2050 par rapport à 2010) et encore plus dans le S3 (-51%), les prairies ainsi libérées devenant des zones de végétation arbustive ou de forêts²³.

Une transition vers une agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050 serait possible sans transformation des régimes alimentaires européens, mais ce serait au détriment des exportations européennes (S1). Sachant que les surfaces cultivables sont constantes, et en poursuivant l'évolution tendancielle des régimes alimentaires, une réduction du volume de production de l'agriculture européenne (hypothèse de production lb) entraînerait une forte réduction des exportations européennes. Si l'Europe souhaitait conserver sa position d'exportateur sur les marchés mondiaux, de plus hauts rendements ou une extension des superficies cultivées seraient nécessaires.

L'adoption de régimes sains (S2) ou de régimes sains et plus respectueux de l'environnement (S3) laisserait à l'Europe une certaine marge de manœuvre pour équilibrer les ressources et les usages tout en devenant exportateur net de calories. Dans les scénarios S2 et S3, les Européens consomment moins de calories, et moins d'aliments

23. Les prairies et pâtures libérées pourraient également subsister en 2050 et être utilisées pour l'élevage extensif ou à d'autres fins (production d'énergie, par exemple).

d'origine animale. Ce régime plus frugal entraîne une diminution de l'utilisation de denrées alimentaires pour la consommation humaine (-13% dans le S2, -20% dans le S3) et animale (respectivement -24% et -43% dans les scénarios 2 et 3) par rapport à 2010. Dans ces scénarios, même avec une réduction du volume de production, les usages domestiques diminuent plus que la production domestique et l'Europe n'est plus importatrice nette comme en 2010 (200.10^{12} kcal), mais exportatrice nette en 2050 (près de 40.10^{12} kcal dans le S2 et près de 240.10^{12} kcal dans le S3).

Pour répondre aux enjeux climatiques et environnementaux qui menacent l'Europe et le monde, le Pacte vert pour l'Europe vise à transformer l'UE en une économie économe en ressources et compétitive, atteignant la cible de zéro émission nette de GES d'ici à 2050, avec un découplage de la croissance économique par rapport à l'utilisation de ressources fossiles, et sans délaissier des populations ni des territoires.

Les trois scénarios (sauf le S1 avec l'hypothèse de production lh) contribuent positivement à la diminution des émissions européennes de GES et à l'augmentation du stockage de carbone dans les sols et la biomasse. Dans l'hypothèse de rendements en limite basse, les trois scénarios supposent une diminution des émissions de GES par l'agriculture en 2050 par rapport à 2010 : de -8% dans le S1, -20% dans le S2 et -37% dans le S3. Quel que soit le scénario, la majeure partie de la diminution des émissions de GES agricoles provient principalement des réductions d'émissions liées à la production animale. Dans l'hypothèse de rendements en limite haute, on obtient moins de diminution des émissions de GES d'origine agricole dans les trois scénarios, voire une augmentation des émissions de GES dans le scénario S1 ($+9\%$). De plus, par rapport à 2010, les trois scénarios entraînent une diminution des émissions liées aux changements d'affectation des terres en Europe, ce qui renforce la capacité de stockage de carbone de l'Europe pendant toute la période de projection : elle est de -9 millions de tonnes d'équivalent CO_2 par an dans le S1, de -17 millions de tonnes dans le S2 et de -43 millions de tonnes dans le S3.

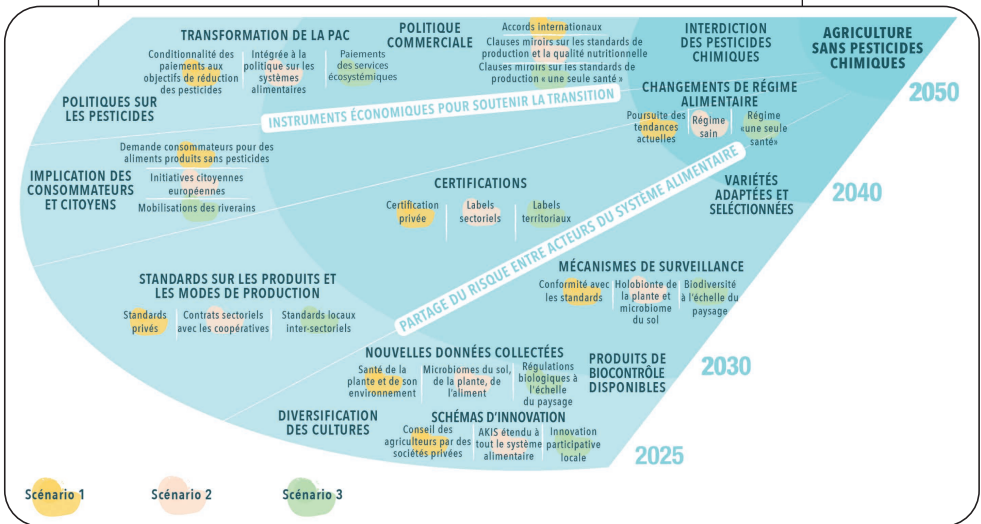
Les trois scénarios contribuent probablement à une amélioration de la biodiversité terrestre en Europe. Le premier impact positif découle de l'élimination des pesticides chimiques dans les trois scénarios. Le deuxième impact positif s'explique par la diversification accrue que l'on retrouve dans les trois scénarios, avec un impact probablement plus important dans le scénario S3 que dans les scénarios S1 et S2. L'attention aux microbiomes du sol et des plantes dans le scénario S2 aura un effet positif important sur la biodiversité microbienne et, indirectement, sur l'ensemble de la biodiversité. D'autres impacts résultent des changements d'affectation des sols induits par les trois scénarios qui, en moyenne, devraient avoir un impact positif sur la biodiversité (pas d'extension de la superficie cultivée, une augmentation des espaces dédiés à des habitats semi-naturels dans le S3. Cette amélioration de la biodiversité pourrait renforcer les mécanismes naturels de régulation dans les trois scénarios, ce qui rend l'objectif du zéro pesticides chimiques encore plus atteignable.

4. Pour une stratégie robuste de transition vers une agriculture sans pesticides chimiques à l'horizon 2050

Dans le chapitre 4 ont été présentés les trois scénarios pour une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050, ainsi que leurs trajectoires de transition. Ces trajectoires européennes ont été élaborées par le groupe d'experts sur la transition et avec le comité d'experts européen de la prospective. À partir de ces trois trajectoires de transition, les éléments robustes pour une transition vers des systèmes sans pesticides chimiques ont été identifiés par le comité d'experts européen lors d'un atelier dédié. Kok *et al.* (2011) définissent les éléments robustes comme des éléments de stratégie qui restent pertinents dans plusieurs types d'évolution future ; des stratégies apparaissent comme robustes « parce qu'elles semblent efficaces dans tous les scénarios qui ont été développés », ou encore « parce qu'elles peuvent réussir indépendamment du scénario qui deviendra réalité ».

À la lumière de l'analyse des trajectoires construites pour chacun des trois scénarios européens, les éléments robustes d'une transition consistant en jalons et en actions communes (figure 7.2), qui ont été identifiés, concernent les politiques publiques, les chaînes de valeur ainsi que les systèmes de connaissances et d'innovation en agriculture.

Figure 7.2. Éléments robustes de la transition vers une agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050



Tout d'abord, à l'origine des trajectoires de transition, une volonté politique doit s'exprimer et se traduire dans des politiques publiques cohérentes destinées à favoriser et à soutenir la transition. En parallèle à la mise en place de politiques réglementaires visant à réduire, et à terme, à interdire l'usage des pesticides chimiques, des politiques publiques doivent accompagner les agriculteurs et les autres acteurs des chaînes de valeur dans la transition vers des systèmes sans pesticides chimiques. Cela implique de mettre en place des politiques plus holistiques, notamment de transformer la PAC avant 2030 en une politique de soutien à la transition, de créer des instruments économiques pour supporter financièrement la transition (tels que la couverture des risques), de mettre en œuvre des politiques alimentaires et nutritionnelles pour soutenir les changements de régimes alimentaires (S2 et S3), et de mettre en cohérence les politiques agricoles, environnementales et alimentaires. Il s'agit également de prévoir des mécanismes de partage des risques entre les différents acteurs de la chaîne de valeur, basés sur les chaînes alimentaires (à travers des contrats) ou sur les acteurs des territoires (au moyen d'une coordination territoriale).

Dans toutes les trajectoires, la transition exige également que de nouveaux accords commerciaux soient conclus avec les partenaires non européens, à partir de 2030, afin d'appliquer des normes de production similaires (au moyen de clauses miroirs) pour chaque produit présent sur le marché européen.

Les consommateurs, les citoyens et les habitants ont un rôle clé à jouer tout au long de la trajectoire de transition. En début de trajectoire, ils expriment leurs préoccupations concernant les pesticides chimiques et leurs impacts sur la santé humaine, l'environnement et la biodiversité. Plus tard dans la trajectoire (dans les années 2040), le changement de leurs comportements alimentaires et de leurs habitudes alimentaires accompagne la transition des systèmes alimentaires (pour les scénarios S2 et S3). Toutes les transitions nécessitent également la définition de nouveaux standards de production des produits issus d'une agriculture sans pesticides chimiques à partir de 2025, au travers de la certification des productions et de leur valorisation par des labels alimentaires.

En début de transition, des systèmes de connaissances et d'innovation en agriculture sont nécessaires pour co-concevoir avec les agriculteurs des systèmes de culture sans pesticides chimiques. De plus, la diversification des cultures est mobilisée dans chaque transition, bien qu'à des intensités différentes selon le scénario. Le développement et la disponibilité des bio-intrants vers 2030 sont également nécessaires dans chaque trajectoire de transition, tout comme le développement et l'utilisation de nouvelles variétés cultivées adaptées à chaque scénario et à chaque système de culture. Enfin, toutes les trajectoires impliquent un développement de systèmes de surveillance de l'environnement et d'anticipation des bioagresseurs.

Il en résulte que, pour réussir, une transition vers des systèmes sans pesticides chimiques nécessite des mesures fortes et coordonnées qui reposent sur une multitude d'initiatives et de transformations de la part des différents acteurs de la chaîne de valeur, à des échelles variées.

5. Les dix messages clés de l'étude prospective

1. Construire une agriculture sans pesticides chimiques en Europe en 2050 suppose la prise en compte du système alimentaire dans sa globalité, et l'implication de tous ses acteurs.
2. En plus de permettre la transition vers une agriculture sans pesticides chimiques, les scénarios pourraient contribuer à améliorer la souveraineté alimentaire en Europe, la nutrition et la santé des populations, le bilan des émissions de gaz à effet de serre, la biodiversité et l'état général des écosystèmes.
3. Par la modification de leurs régimes alimentaires, les consommateurs européens jouent un rôle considérable dans la transition vers une agriculture sans pesticides chimiques. Même sans une modification des régimes alimentaires, la transition reste possible, mais elle se ferait au détriment de la balance commerciale agricole européenne à moins d'une augmentation des rendements ou d'une expansion des surfaces cultivées en Europe.
4. Il convient de trouver un équilibre entre la réduction de la consommation de produits animaux et le maintien des prairies.
5. Une protection efficace des cultures sans pesticides chimiques repose sur plusieurs leviers qui doivent être combinés : la diversification des cultures dans le temps et l'espace, le développement de produits de biocontrôle ou de bio-intrants, une sélection variétale adaptée, des agroéquipements et outils numériques, et des outils de suivi de la dynamique des bioagresseurs et de l'environnement. Les mécanismes de régulation biologique à l'échelle du sol, de la parcelle et du paysage doivent être privilégiés, de même que les actions prophylactiques.
6. Plusieurs systèmes de culture sans pesticides sont possibles selon qu'ils reposent sur un niveau élevé d'intrants exogènes ou sur un haut niveau de diversification et de services écosystémiques.
7. La résilience de chaque scénario au changement climatique peut-être évaluée à l'aune de sa robustesse (liée à des facteurs internes, comme la diversification et les services écosystémiques) et de son adaptabilité (liée à des facteurs externes comme par exemple, les intrants extérieurs).
8. Élaborer des stratégies de protection des cultures efficaces sans pesticides chimiques suppose de développer les connaissances et les techniques sur les processus biologiques, des données et des outils de simulation, afin de mettre au point des outils d'anticipation et de prophylaxie pour la gestion des bioagresseurs, de modeler le paysage, et de comprendre les microbiomes des sols, l'holobionte de la plante et les mécanismes d'immunité des plantes.
9. La transition vers une agriculture sans pesticides chimiques doit s'appuyer sur une combinaison de politiques publiques cohérentes concernant l'utilisation des pesticides, articulées avec d'autres politiques comme les politiques alimentaires et les

politiques environnementales ; elle suppose une transformation de la Politique agricole commune et des instruments économiques utilisés pour soutenir cette transition ; enfin des accords commerciaux aux frontières de l'Union européenne doivent garantir le développement de marchés sans pesticides chimiques.

10. La transition doit également intégrer un partage des risques entre les acteurs, une co-conception des technologies et des systèmes de culture, et une transformation des secteurs amont et aval de l'agriculture.

Annexe 1. La méthode de la prospective « Agriculture européenne sans pesticides en 2050 »

Mora O., Le Mouël C., Meunier C.

De manière générale, la prospective peut se définir comme « un processus systématique et participatif de collecte d'informations sur le futur et de construction d'une vision à moyen et long terme visant à faciliter les décisions actuelles » (Miles *et al.*, 2016). On peut ainsi définir la prospective « Agriculture européenne sans pesticides en 2050 » comme un processus de construction de plusieurs visions à moyen et long terme, dont l'objectif est d'élaborer différentes trajectoires (ou chemins) qui pourraient être empruntées pour parvenir à une agriculture européenne sans pesticides chimiques à l'horizon 2050.

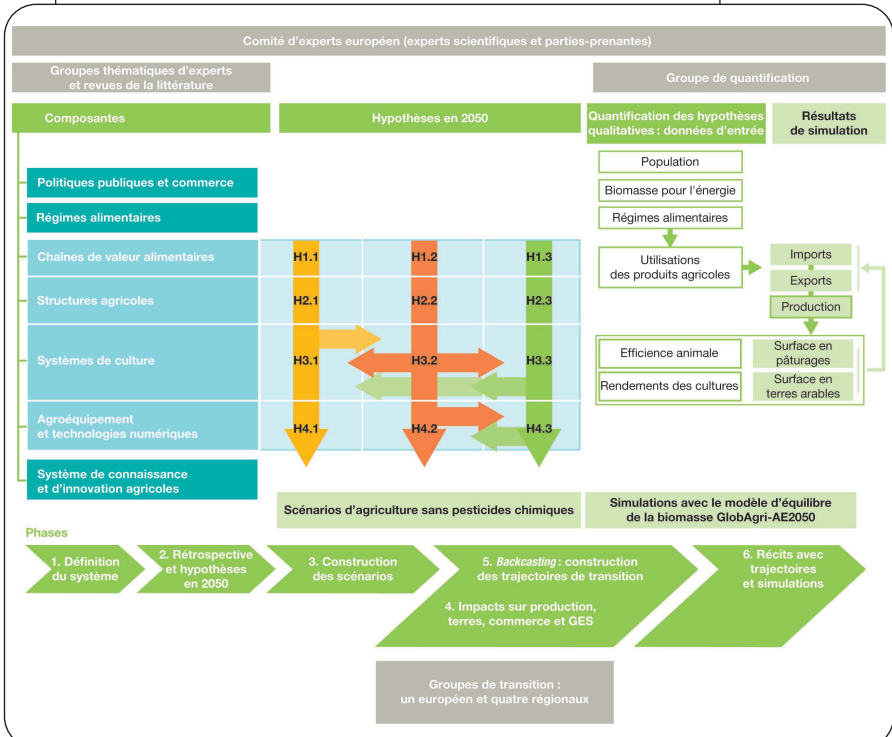
1. Les groupes d'experts mobilisés dans la prospective

Cent quarante-quatre experts européens, scientifiques et parties prenantes ont été associés aux différentes étapes de la prospective au sein de différents groupes d'experts (en gris dans la figure A.1 ; composition des groupes présentée dans l'introduction générale et l'annexe 3).

Les principaux groupes impliqués tout au long de l'étude prospective sont les suivants :

- une équipe projet INRAE de la Direction de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études (DEPE) a mené l'ensemble du projet, et construit les analyses rétrospectives sur les composantes du système. L'équipe du projet a également co-conduit l'élaboration des hypothèses, des microscénarios, des scénarios, des trajectoires de transition et de la quantification des scénarios, en s'appuyant sur les contributions du comité d'experts européen, ainsi que des différents groupes d'experts ;
- un comité d'experts européen (partie supérieure de la figure A.1) a co-conduit l'élaboration des scénarios et l'ensemble de la démarche (six réunions entre septembre 2020 et octobre 2022) ;
- un comité de suivi comprenant des représentants des ministères français (ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ministère de la Transition écologique), et du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement ».

Figure A.1. Méthode générale de l'étude prospective
« Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 »



Dans la partie centrale, les flèches colorées représentent les combinaisons d'hypothèses formant les scénarios. La méthode prospective est fondée sur un « système » (partie gauche) divisé en composantes qui sont : politiques publiques et commerce, régimes alimentaires, chaînes de valeur alimentaires, structures agricoles, systèmes de culture, agroéquipements et technologies numériques, système de connaissance et d'innovation agricoles.

D'autres groupes d'experts (en gris dans la figure A.1) ont été engagés ponctuellement à différents stades de l'étude prospective et ont alimenté la réflexion de l'équipe projet et du comité d'experts :

- quatre groupes thématiques ont étudié les systèmes de culture sans pesticides (partie supérieure gauche de la figure A.1) : un groupe sur la « Réduction de la pression des bioagresseurs », un autre sur le « Renforcement de la résistance des plantes », un groupe sur les « Systèmes de culture » et un groupe sur les « Agroéquipements et les technologies numériques » ;

- un groupe d'experts sur la transition a travaillé sur l'identification des trajectoires de transition à l'échelle européenne intégrant les politiques publiques d'accompagnement (partie inférieure de la figure A.1) ;
- un groupe d'experts sur la quantification a traduit les scénarios en données quantitatives pour la modélisation, puis a analysé et discuté les résultats des simulations (partie supérieure droite de la figure A.1) ;
- un groupe de réflexion, composé de scientifiques des projets de recherche du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement », a identifié les recherches nécessaires pour atteindre les scénarios en 2050 ;
- quatre groupes régionaux en Finlande, France, Italie et Roumanie ont élaboré des trajectoires de transition pour des filières et des régions spécifiques (partie inférieure de la figure A.1).

En outre, des entretiens individuels avec des experts ont été menés pour l'analyse rétrospective et pour le travail de quantification. Les noms et affiliations des experts ayant été impliqués dans la prospective sont précisés dans l'annexe 3.

2. Les sept étapes de la prospective

La prospective a été conduite en sept étapes sur une durée de deux ans.

I Étape 1 : la définition du système et de ses composantes

Le comité d'experts et l'équipe projet ont défini dans un premier temps le « système » de la prospective, qui est détaillé dans la figure I.1 (p. 19). Ce système comprend différentes composantes : systèmes de culture, structures agricoles, système de connaissance et d'innovation agricoles, secteur amont de l'agriculture, chaîne de valeur et consommation alimentaire, gouvernance et politiques publiques, commerce. Le changement climatique a été pris en compte au travers de son impact futur sur les bioagresseurs et sur les interactions entre cultures et bioagresseurs (chapitre 2, section 2). L'analyse du secteur amont de l'agriculture a été initialement réduite aux agroéquipements et aux technologies numériques (chapitre 3, section 2). D'autres éléments concernant la production de produits de biocontrôle, le suivi et la surveillance des bioagresseurs et de l'environnement, et la production de semences ont été introduits par la suite au moment de la construction des scénarios et des trajectoires de transition. Le commerce a été analysé avec les politiques publiques par le biais des règles du commerce international, et discuté lors de l'étape de quantification des scénarios (chapitre 4, section 2, p. 188-189 ; et chapitre 5).

I Étape 2 : la réalisation d'une analyse rétrospective et l'élaboration de microscénarios d'évolution des composantes du système

L'analyse rétrospective vise à identifier les tendances passées des composantes du système afin de comprendre sa dynamique actuelle.

Le but de l'analyse rétrospective est d'identifier les grandes tendances, les signaux faibles ou les germes de changement, et les éventuelles ruptures à long terme. L'analyse rétrospective est à la base du raisonnement de la prospective, car c'est en s'appuyant sur l'analyse du passé et du présent que l'on peut construire des hypothèses d'évolution future (soit en extrapolant des tendances actuelles, soit en généralisant des signaux faibles, soit en imaginant des ruptures à venir dans les dynamiques). En effet, même si l'objectif de la prospective est de construire des hypothèses normatives, il est nécessaire de savoir si ces hypothèses normatives sont dans le prolongement, ou en rupture avec les dynamiques actuelles, et s'il existe des signaux faibles dans le présent qui préfigurent leur émergence.

L'analyse rétrospective des évolutions des trente dernières années s'appuie sur la constitution d'une base de connaissances. En s'appuyant sur des revues de littérature et des groupes d'experts, des analyses rétrospectives et prospectives ont été menées sur les systèmes de culture, les chaînes de valeur alimentaires, les structures agricoles et les politiques publiques. Les composantes ont été analysées afin d'identifier les tendances passées et actuelles en utilisant, lorsqu'elles étaient disponibles, des séries temporelles de données provenant d'Eurostat.

Des ateliers thématiques d'experts scientifiques ont été organisés pour analyser les tendances passées et les microscénarios d'évolution des composantes « Système de culture » ainsi que « Agroéquipements et technologies numériques ».

Pour d'autres composantes, telles que les chaînes de valeur alimentaires, les régimes alimentaires, les structures agricoles, les politiques publiques ainsi que les systèmes de connaissance et d'innovation, les analyses rétrospectives ont été menées par l'équipe de projet au travers des revues de la littérature scientifique et des entretiens avec des experts, puis ont été examinées par le comité d'experts européen.

Les chapitres 1 et 2 présentent les tendances passées et les microscénarios d'évolution future pour les systèmes de culture sans pesticides chimiques en Europe. Les sections 1 et 2 du chapitre 3 présentent les tendances passées et les microscénarios d'évolution future respectivement pour les structures agricoles en Europe et les agroéquipements et technologies numériques. La section 3 du chapitre 3 présente les tendances passées et les microscénarios d'évolution future pour les chaînes de valeur alimentaires pour une agriculture sans pesticides en Europe. La section 2 du chapitre 4 présente les tendances passées et les hypothèses d'évolution des politiques publiques pour une agriculture sans pesticides en Europe (p. 182-191), puis des systèmes de connaissance et d'innovation agricoles pour une agriculture sans pesticides en Europe (p. 191-196), et enfin des régimes alimentaires (p. 196-201).

I Étape 3 : la construction des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050

À l'issue de l'étape 2, des microscénarios contrastés sur les changements normatifs et plausibles en 2050 ont été élaborés pour chaque composante. Ces microscénarios constituent les « briques » pour la construction du tableau morphologique (Ritchey, 2011 ; graphique dans le panneau central de la figure A.1 ; pour chaque composante, les différents microscénarios d'évolution en 2050 sont reportées en ligne dans le tableau). Les composantes impliquées dans l'élaboration des scénarios sont les suivantes : chaînes de valeur alimentaires, structures agricoles, systèmes de culture, et agroéquipement et technologies numériques.

Trois scénarios contrastés ont été élaborés sur la base de discussions approfondies au sein du comité d'experts européen en janvier 2022. Le comité d'experts européen a d'abord révisé les microscénarios d'évolution en 2050 de toutes les composantes, qui résultaient de l'étape précédente. Il a ensuite construit des scénarios contrastés en mobilisant le tableau morphologique. Chaque scénario combine un ou plusieurs microscénarios d'évolution par composante, en construisant des relations de causalité et en ayant une exigence de cohérence entre microscénarios ainsi qu'en recherchant une plausibilité du scénario final obtenu par un processus combinatoire. Chaque scénario décrit un basculement complet de l'agriculture européenne vers une agriculture sans pesticides chimiques en 2050 et est développé dans un récit. Les scénarios ont été élaborés en les contrastant entre eux, de manière à ce que le jeu des trois scénarios décrive le champ des évolutions possibles vers une agriculture sans pesticides chimiques. Les récits des scénarios ont été rédigés par l'équipe projet et révisés par les experts du comité d'experts européen. Ils sont présentés dans la section 1 du chapitre 4.

I Étape 4 : la quantification des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050

Les impacts quantitatifs des scénarios en matière d'usage des terres, de production agricole, de commerce et d'émissions de gaz à effet de serre ont été analysés et discutés dans le cadre d'un processus itératif avec le groupe de quantification et le comité d'experts européen.

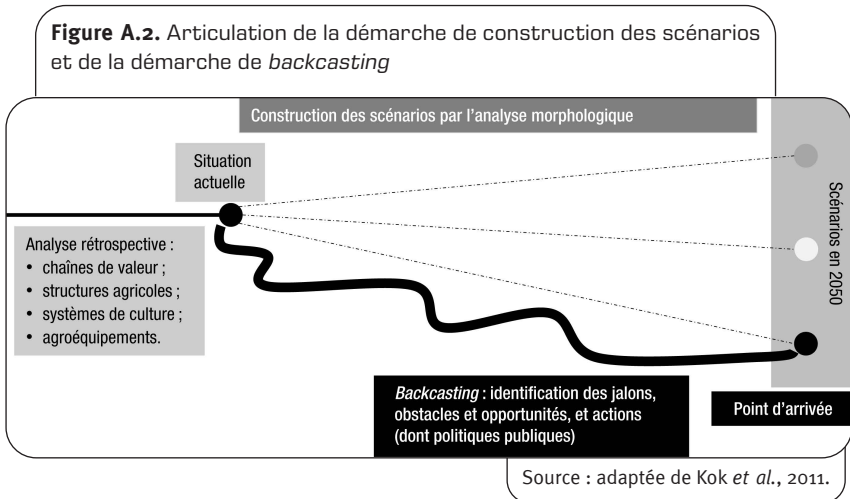
Les simulations de scénarios ont été réalisées grâce au modèle GlobAgri-AE2050. La structure et le fonctionnement du modèle sont décrits dans l'annexe 2.

Pour la simulation de scénarios, le point de départ est le tableau morphologique, qui présente les microscénarios d'évolution pour chaque composante. Ces hypothèses qualitatives sont d'abord traduites en entrées quantitatives du modèle. Cela implique l'établissement de matrices de traduction détaillées entre les hypothèses qualitatives globales (par exemple, l'évolution des systèmes de culture) et les niveaux d'entrée du modèle pour chaque produit agroalimentaire dans chaque région géographique (par exemple, le niveau des rendements des cultures et d'intensité culturale en 2050). Ces

matrices de traduction sont présentées en détail dans le chapitre 5. Une fois que toutes les hypothèses qualitatives ont été traduites en données quantitatives d'entrée pour le modèle, les scénarios peuvent être simulés. Les résultats de la simulation des scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques sont présentés au chapitre 5.

■ Étape 5 : l'élaboration de trajectoires de transition vers les scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques en Europe

Sur la base des scénarios génériques élaborés au cours de l'étape 3, deux approches de construction de trajectoires par une méthode de *backcasting* (Robinson, 1982 ; Kok *et al.*, 2011) ont été menées en parallèle afin d'explorer les conditions requises pour atteindre les scénarios en 2050 (figure A.2).



La première approche de construction de trajectoire a consisté à changer d'échelle et à mobiliser les scénarios européens dans des études de cas régionales pour construire avec les acteurs locaux des trajectoires de transition vers des systèmes sans pesticides chimiques. Les études de cas régionales complètent le travail effectué en illustrant chaque scénario pour des systèmes de culture donnés et un secteur alimentaire spécifique dans une région donnée. Des partenariats ont été développés avec les coordinateurs régionaux qui faisaient partie du comité d'experts européen. Ces études ont été réalisées en mettant en œuvre une approche participative, impliquant des experts de la région et du secteur étudié ayant des expertises complémentaires (annexe 3) : chercheurs, agriculteurs, responsables d'organisations non gouvernementales, de l'agro-industrie ou de collectivités territoriales, conseillers

agricoles, etc. Grâce à une méthode spécifique combinant le changement d'échelle des scénarios et une approche de *backcasting*, quatre études de cas régionales ont été menées dans le sud de la Finlande sur la production de céréales et d'oléagineux, dans le sud sud-est de la Roumanie sur la culture de légumes, en Toscane (Italie) sur la production de blé dur, dans la région de Bergerac Duras (France) sur la production viticole. Ces quatre études régionales et leurs résultats sont présentés dans le chapitre 6.

La deuxième approche de construction de trajectoire a été menée à l'échelle européenne afin d'imaginer différents chemins pour atteindre en Europe les scénarios d'agriculture sans pesticides chimiques. Un groupe européen d'experts sur la transition a été constitué avec des membres du comité d'experts européen, des chercheurs travaillant sur les transitions et des coordinateurs d'ateliers régionaux. La construction de la trajectoire de transition a été divisée en deux séquences. Lors d'un premier atelier, les participants ont imaginé, sur la base d'une revue de la littérature scientifique, des hypothèses contrastées d'évolution des politiques publiques et des systèmes de connaissance et d'innovation qui pourraient accompagner la transition vers les différents scénarios en 2050 (figure A.2). Au cours d'un deuxième atelier, sur la base des scénarios existants, les experts ont défini les jalons pouvant mener à chaque scénario, identifié les obstacles et les opportunités pour l'atteinte des jalons, et imaginé les actions à mettre en œuvre. Enfin, ils ont élaboré une frise chronologique pour chaque scénario (figure A.2). À la suite des deux réunions du groupe de transition européen, par le biais d'une réunion spécifique du comité d'experts européen, les frises chronologiques ont été converties en récits de la trajectoire de transition pour chaque scénario, intégrant des hypothèses de changement de régime alimentaire. Les récits des transitions sont présentés dans la section 1 du chapitre 4 à la suite du récit de chaque scénario.

■ Étape 6 : l'évaluation des scénarios et des trajectoires de transition

Lors d'une réunion dédiée, regroupant des chercheurs impliqués dans les projets financés par le programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement », les besoins de recherche et les connaissances manquantes pour chaque scénario ont été identifiés. Il s'agissait de repérer les domaines et les objets de recherche qui devraient être développés ou renforcés pour accompagner les changements vers les différents scénarios (chapitre 7).

Enfin, dans une dernière étape, pour pouvoir comparer les implications des scénarios, les scénarios et les trajectoires de transition ont été analysés en termes de forces et de faiblesses à travers une analyse SWOT (pour *strengths, weaknesses, opportunities and threats* en anglais) des trois scénarios (chapitre 7).

■ Étape 7 : la diffusion publique des résultats de la prospective

Les scénarios d'agriculture européenne sans pesticides chimiques, par leur pertinence et par les questions qu'ils soulèvent, cherchent à ouvrir une conversation stratégique sur les futurs possibles et souhaitables avec les acteurs concernés. Ainsi, à l'aide des livrables décrits précédemment, les scénarios de la prospective ont été exposés et discutés dans les différentes arènes avec des acteurs intéressés : décideurs nationaux et européens, chercheurs, acteurs professionnels de l'agriculture, acteurs de la société civile, acteurs parties prenantes des chaînes de valeur et collectivités territoriales.

Les scénarios ont vocation à changer le regard que l'on porte sur le présent pour permettre aux acteurs de s'engager dans des transformations. Les scénarios visent à développer les capacités des acteurs à imaginer les futurs possibles, et éventuellement à les traduire dans leur situation concrète (la littératie du futur développée par Miller [2018]). Pour autant, l'usage des scénarios dépend directement des intérêts stratégiques d'un acteur et des projets qu'il envisage ; un scénario vu comme favorable par un acteur ne le sera pas forcément pour un autre. Les représentations du futur sont l'objet de débats et de contestations permanentes entre les acteurs concernés dans l'espace public. Aussi, il s'agit à partir des résultats de la prospective d'ouvrir un débat public sur les possibilités et les enjeux d'une transition vers une agriculture sans pesticides chimiques. Enfin, les scénarios sont également mobilisés pour la programmation de la recherche afin d'anticiper les orientations de recherche qu'il convient de développer ou de renforcer pour préparer les évolutions à venir des systèmes de culture et des systèmes alimentaires.

Annexe 2.

Le modèle GlobAgri-AE2050

1. GlobAgri

La plate-forme GlobAgri²⁴ a été développée par le Cirad et INRAE pour générer des bases de données cohérentes et des modèles de bilans de biomasse à partir des données issues de FAOStat et de quelques autres sources.

Les bases de données générées sont équilibrées et tiennent compte des liens entre les produits (au travers de l'alimentation animale ou de la trituration des oléagineux par exemple).

Les modèles de bilans de biomasse sont constitués d'équations qui équilibrent les ressources (production domestique et importations) et les utilisations (alimentation humaine, alimentation animale, autres utilisations et exportations) pour chaque pays ou grande région et chaque produit agroalimentaire considérés.

Dans chaque équation, la quantité de produit utilisée pour l'alimentation animale est une combinaison linéaire des quantités produites de produits animaux (au travers des ratios quantité ingérée / quantité de produit animal produite). Les importations dépendent linéairement de l'utilisation domestique totale (au travers des coefficients d'importation). Les exportations sont une fonction linéaire de la taille du marché mondial (au travers des parts de marché à l'exportation).

Pour assurer la cohérence globale du modèle, deux contraintes sont introduites : la première garantit qu'au niveau mondial, pour chaque produit agroalimentaire, la somme des importations de tous les pays ou grandes régions est égale à la somme des exportations de tous les pays ou grandes régions ; la seconde assure que pour chaque pays ou grande région, la superficie cultivée reste inférieure ou égale à la surface maximale cultivable.

GlobAgri simule l'impact de changements des systèmes agricoles et agroalimentaires mondiaux et régionaux sur la production et les échanges de produits agroalimentaires, l'usage des terres (superficie cultivée et surface en prairies permanentes) et les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial et régional. Le tableau A.1 présente les variables d'entrée et les paramètres du modèle. Ce sont ces variables et paramètres que le modélisateur peut modifier pour représenter le scénario à simuler.

24. <https://globagri.org/>

Par exemple, le scénario simulé peut impliquer un changement dans le régime alimentaire et dans les systèmes de production agricole d'une région. Cela se traduirait par une modification des niveaux de consommation de produits agroalimentaires, ainsi que des niveaux de rendement des cultures et de productivité de l'élevage par rapport à la situation initiale dans la région considérée. Dans ce cas, les niveaux d'importation, d'exportation et de production intérieure s'ajustent pour rétablir l'équilibre entre les ressources et les utilisations domestiques dans cette région. Comme les importations de la région considérée sont produites à l'étranger tandis que ses exportations remplacent de la production à l'étranger, les équilibres dans les autres régions s'ajustent également. Par conséquent, les besoins en superficie cultivée et en surface de prairies permanentes changent dans toutes les régions.

Lorsqu'aucune région n'atteint sa surface maximale cultivable, les ajustements cessent et un nouvel équilibre mondial est atteint. Dans ce cas, les coefficients d'importation et les parts de marché à l'exportation restent exogènes. Lorsqu'une ou plusieurs régions ont besoin d'une superficie cultivée qui excède leur surface maximale cultivable, des ajustements supplémentaires sont nécessaires pour rétablir l'équilibre. Dans les régions qui violent la contrainte de surface maximale cultivable, on réduit d'abord les parts de marché à l'exportation (réduction équiproportionnelle pour tous les produits). Si la contrainte n'est toujours pas respectée lorsque toutes les exportations ont été mises à zéro alors on augmente les coefficients d'importation (augmentations équiproportionnelles par groupe de produits ; Le Mouël *et al.*, 2018). En d'autres termes, lorsqu'une région dépasse sa surface maximale cultivable, on diminue ses exportations de produits et donc, indirectement, ses exportations de superficies cultivées et, si nécessaire, on augmente ses importations de produits et donc, indirectement, ses importations de superficies cultivées.

GlobAgri est décrit en détail dans Le Mouël *et al.* (2018) et Mora *et al.* (2020).

Tableau A.1. Les variables et paramètres d'entrée de GlobAgri		
Variables	Définition	Exemples d'hypothèses présentes dans les scénarios simulés pouvant être prises en charge
Ali. hum. _{ij}	Quantité de produit i utilisée en alimentation humaine dans la région j	Évolution de la population dans la région j Évolution du régime alimentaire dans la région j
Aut. util. _{ij}	Quantité de produit i utilisée pour les autres usages dans la région j	Évolution de l'utilisation non alimentaire de la biomasse agricole (bioénergie par exemple) dans la région j
Surf _j	Surface cultivable maximale dans la région j	Dégradation ou restauration des sols dans la région j Expansion ou réduction de la surface irriguée dans la région j Impact du changement climatique dans la région j

Variables	Définition	Exemples d'hypothèses présentes dans les scénarios simulés pouvant être prises en charge
$Rend_{v,j}$	Rendement pas hectare de la culture v dans la région j	Progrès technique, changement de pratique, changement de système de culture dans la région j Expansion ou réduction de la surface irriguée dans la région j Impact du changement climatique dans la région j
Paramètres		
β_{iaj}	Coefficient input/output (quantité aliment i ingérée/quantité produit animal a produite) dans la région j	Progrès technique, changement de pratique, changement de système d'élevage dans la région j
e_j	Rapport de la superficie cultivée sur la superficie récoltée dans la région j	Évolution de l'intensité culturale dans la région j
α_{ij}^*	Coefficient d'importation du produit i dans la région j	Changement de la politique commerciale de la région j
σ_{ij}^*	Part du marché mondial de la région j pour le produit i	Changement de la politique commerciale de la région j

2. GlobAgri-AE2050

Lorsque GlobAgri est utilisé pour une étude particulière, une version spécifique du modèle est développée. Cette version spécifique choisit sa nomenclature en matière de produits, sa nomenclature géographique et sa règle de bouclage (contrainte de surface, qui dans la version de base est définie sur la superficie cultivée, mais peut également être définie sur la surface agricole totale ; réduction ou non des parts de marché à l'exportation ; ajustement uniforme ou différencié par groupe de produits). Pour différencier les différentes versions du modèle, chaque version est nommée GlobAgri-Nom de l'étude.

Pour cette prospective, nous avons utilisé la version de GlobAgri qui a été développée pour l'étude « Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 » (dite AE2050 ; Tibi *et al.*, 2020) : GlobAgri-AE2050.

Dans cette version, la règle de bouclage n'a pas été modifiée par rapport à la version de base décrite ci-dessus. La situation initiale est l'année de base 2010 qui correspond à la moyenne 2009-2011. GlobAgri-AE2050 considère 38 agrégats de produits, dont 5 fourrages (tableau A.2) et 21 pays ou grandes régions, dont 8 sous-régions européennes (tableau A.3).

Tableau A.2. Composition des 38 agrégats agroalimentaires de Globagri-AE2050

Agrégats	Composition
Animaux aquatiques	Poissons d'eau douce, perciformes, poissons pélagiques, autres poissons marins, crustacés, céphalopodes, mollusques, mammifères aquatiques, autres animaux aquatiques
Viande bovine	Viande bovine
Lait et produits laitiers	Agrégat lait, beurre exclu
Œufs	Œufs
Viande de porc	Viande de porc
Viande de volaille	Viande de volaille
Viande de petits ruminants	Viande de mouton et de chèvre
Fibres, etc.	Jute, fibres analogues au jute, fibres molles autres, sisal, abaca, fibres dures autres, tabac, caoutchouc, graine de coton
Fruits et légumes	Tomates, oignons, autres légumes, oranges, mandarines, citrons, limes, pamplemousses, autres agrumes, bananes, plantains, pommes, ananas, dattes, raisins, autres fruits
Autres produits végétaux	Noix, café, fèves de cacao, thé, poivre, piments, clous de girofle, autres épices
Autres produits	Autres viandes, abats comestibles, graisses animales crues, miel, farine de viande, plantes aquatiques
Légumineuses	Haricots, pois, autres légumineuses
Racines et tubercules	Pommes de terre, manioc, patates douces, autres racines, ignames
Mais	Mais
Autres céréales	Orge, seigle, avoine, millet, sorgho, autres céréales
Riz	Riz et produits
Blé	Blé
Plantes et produits sucriers	Canne à sucre, betterave à sucre
Autres oléagineux	Arachides décortiquées, coco – incl. Coprah, graine de sésame, olives, autres oléagineux
Tourteau d'autres oléagineux	Tourteau d'autres oléagineux (voir agrégat autres oléagineux)
Huile d'autres oléagineux	Huile d'autres oléagineux (voir agrégat autres oléagineux)
Fruits du palmier à huile	Noix de palme, fruit
Huile de palme et de palmiste	Huile de palme, huile de palmiste

Agrégats	Composition
Tourteau de palmiste	Tourteau de palmiste
Graine de colza	Graine de colza et moutarde
Tourteau de colza	Tourteau de colza et moutarde
Huile de colza	Huile de colza et moutarde
Graine de soja	Graine de soja
Tourteau de soja	Tourteau de soja
Huile de soja	Huile de soja
Graine de tournesol	Graine de tournesol
Tourteau de tournesol	Tourteau de tournesol
Huile de tournesol	Huile de tournesol
Fourrages	
Herbe	Herbe pâturée et en ensilage des prairies permanentes
Fourrages herbe cultivés	Prairies temporaires (herbe mixte et ray-grass)
Fourrages non herbe cultivés	Luzerne et plantes fourragères (betterave, légumes, sorgho, légumineuses, maïs, etc.)
Fourrages occasionnels	Déchets alimentaires, alimentation de parcours, etc.
Résidus de culture	Pailles, tiges, etc.

Tableau A.3. Composition des 21 pays ou grandes régions de Globagri-AE2050

Pays ou régions	Composition
France	France
Allemagne	Allemagne
Royaume-Uni	Royaume-Uni
Pologne	Pologne
Europe du Sud	Albanie, Bosnie Herzégovine, Croatie, Macédoine du Nord, Monténégro, Andorre, Chypre, Gibraltar, Grèce, Vatican, Italie, Malte, Monaco, Portugal, Saint Marin, Slovénie, Espagne
Europe de l'Est	Serbie, Bulgarie, Hongrie, Roumanie
Europe centrale	Suisse, Autriche, Tchéquie, Slovaquie
Reste de l'Europe	Norvège, Danemark, Suède, Finlande, Estonie, Irlande, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Pays-Bas, Belgique, Luxembourg

Pays ou régions	Composition
Canada et États-Unis	Canada, États-Unis
Brésil et Argentine	Brésil, Argentine
Reste de l'Amérique	Antigua-et-Barbuda, Bahamas, Barbade, Bermudes, Bolivie (État plurinational de), Aruba, Belize, Îles Caïmans, Chili, Colombie, Costa Rica, Cuba, Dominique, République dominicaine, Equateur, El Salvador, Grenade, Guatemala, Guyana, Haïti, Honduras, Jamaïque, Mexique, Montserrat, Antilles néerlandaises (ex), Nicaragua, Panama, Paraguay, Pérou, Porto Rico, Saint-Kitts-et-Nevis, Sainte-Lucie, Saint-Vincent-et-les Grenadines, Suriname, Trinité-et-Tobago, Îles Turques-et-Caïques, Uruguay, Venezuela (République bolivarienne du), Îles Vierges britanniques, Îles Vierges américaines, Anguilla, Îles Falkland (Malvinas), Guyane Française, Guadeloupe, Martinique
Ex-URSS	Arménie, Azerbaïdjan, Belarus, Géorgie, Kazakhstan, Kirghizistan, Fédération de Russie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine, Ouzbékistan
Chine	Chine
Inde	Inde
Reste de l'Asie	Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Territoire britannique de l'océan Indien, Brunei Darussalam, Myanmar, Sri Lanka, Îles Cook, Indonésie, Japon, Cambodge, République populaire démocratique de Corée, République de Corée, République démocratique populaire lao, Malaisie, Maldives, Mongolie, Népal, Pakistan, Philippines, Timor-Leste, Singapour, Thaïlande, Vietnam
Proche-Orient et Moyen-Orient	Israël, Jordanie, Liban, Syrie, Territoire Palestinien Occupé, Bahreïn, Iran (République Islamique), Irak, Koweït, Oman, Qatar, Arabie Saoudite, Turquie, Emirats Arabes Unis, Yémen, Sahara Occidental
Afrique du Nord	Algérie, Égypte, Libye, Maroc, Tunisie
Afrique de l'Ouest	Cap Vert, Bénin, Gambie, Guinée-Bissau, Guinée, Côte d'Ivoire, Mali, Niger, Sénégal, Togo, Burkina Faso, Ghana, Libéria, Nigéria, Sierra Leone
Afrique ECS (de l'Est, centrale et du Sud)	Angola, Botswana, Burundi, Cameroun, République Centrafricaine, Tchad, Comores, Congo, Guinée équatoriale, Djibouti, Gabon, Kenya, Lesotho, Madagascar, Malawi, Mauritanie, Maurice, Mozambique, Namibie, Érythrée, Zimbabwe, Rwanda, Sainte-Hélène, Ascension et Tristan da Cunha, Sao Tomé-et-Principe, Seychelles, Somalie, Afrique du Sud, Eswatini, République-Unie de Tanzanie, Ouganda, Ethiopie, République Démocratique du Congo, Zambie, Mayotte, Soudan, Soudan du Sud
Océanie	Samoa américaines, Australie, Îles Salomon, Île Christmas, Îles des Cocos (Keeling), Fidji, Polynésie Française, Kiribati, Guam, Îles Marshall, Micronésie (États fédérés de), Nauru, Nouvelle-Calédonie, Vanuatu, Nouvelle-Zélande, Nioué, Île Norfolk, Îles Mariannes du Nord, Papouasie Nouvelle Guinée, Pitcairn, Palaos, Tokélaou, Tonga, Tuvalu, Îles Wake, Îles Wallis-et-Futuna, Samoa
Reste du monde	Terres australes françaises, Islande, République de Moldavie, Îles Féroé, Groenland, Saint Pierre et Miquelon, Îles Anglo-Normandes, Îles Svalbard-et-Jan Mayen, Île de Man

Annexe 3. Listes des experts contributeurs

Tableau A.4. Membres du comité d'experts européen

Autio Sari (Tukes, Finlande), Barberi Paolo (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Bergeret Pascal (Ciheam, France), Bujor-Nenita Oana (UASVMB, Roumanie), Carlesi Stefano (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Christensen Henriette (PAN Europe, Belgique), Ciceoi Roxana (UASVMB, Roumanie), Deguine Jean-Philippe (Cirad, France), Enjalbert Jérôme (INRAE, France), Fintineru Gina (UASVMB, Roumanie), Huber Laurent (INRAE, France), Jeanneret Philippe (Agroscope, Suisse), Kolb Steffen (Zalf, Allemagne), Lamine Claire (INRAE, France), Martin Guillaume (INRAE, France), Messéan Antoine (INRAE, France), Mosnier Aline (Fable consortium, France), Oustrain Savine (Vivescia, France), Porcher Emmanuelle (MNHN, France), Raineau Yann (INRAE, France), Rööös Elin (Slu, Suède)

Tableau A.5. Membres du comité de suivi (France)

Barriuso Enrique (Mesri), Couderc-Obert Céline (MTES, CGDD), Dangy Louise (CEP/Masa), Hardelin Julien (MAA/CEP), Huyghe Christian (INRAE), Jacquet Florence (INRAE), Latruffe Laure (INRAE), Le Loarer Marina (MTE), Prévost Thibault (MTE/CGDD), Richard Guy (INRAE), Schwoob Marie-Hélène (MAA/CEP), Soulard Marie-Camille (MTE)

Tableau A.6. Membres des groupes d'experts thématiques (chapitres 2 et 3) (France)

Groupe « Réduire la pression des bioagresseurs »

Aubertot Jean-Noël (INRAE), Barot Sébastien (IRD), Bedoussac Laurent (INRAE), Charles Raphaël (FIBL, Suisse), Delière Laurent (INRAE), Garcia Vega Diego (Iddri), Lavigne Claire (INRAE), Morris Cindy (INRAE), Rusch Adrien (INRAE), Théron Olivier (INRAE), Valentin-Morison Muriel (INRAE)

Groupe « Renforcer la résistance des plantes »

Ballini Elsa (SupAgro), Corio-Costet Marie-France (INRAE), Desclaux Dominique (INRAE), Julier Bernadette (INRAE), Lemarié Stéphane (INRAE), Moëne-Loccoz Yvan (Université Lyon), Moreau Delphine (INRAE), Mougél Christophe (INRAE), Rameau Catherine (INRAE), Ricroch Agnès (AgroParisTech), Roby Dominique (CNRS), Rolland Bernard (INRAE), Savary Serge (INRAE), Selosse Marc-André (MNHN), Simonin Marie (INRAE), Verdier Jérôme (INRAE)

Groupe « Agroéquipements et technologies numériques »

Baret Frédéric (INRAE), Gilliot Jean-Marc (AgroParisTech), Leclerc Melen (INRAE), Lenain Ronan (INRAE), Ienco Dino (INRAE), Naud Olivier (INRAE), Reboud Xavier (INRAE), Rizzo Davide (UniLassalle), Vaudour Emmanuelle (AgroParisTech)

Groupe « Systèmes de culture » (ateliers du 11-12 février 2021 et du 29 avril 2021)

Aubertot Jean-Noël (INRAE), Ballini Elsa (SupAgro), Bedoussac Laurent (INRAE), Chauvel Bruno (INRAE), Charles Raphaël (FIBL, Suisse), Corio-Costet Marie-France (INRAE), Delière Laurent (INRAE), Desclaux Dominique (INRAE), Enjalbert Jérôme (INRAE), Ienco Dino (INRAE), Julier Bernadette (INRAE), Latruffe Laure (INRAE), Lavigne Claire (INRAE), Leclerc Melen (INRAE), Lemarié Stéphane (INRAE), Moëgne-Loccoz Yvan (Université de Lyon), Moreau Delphine (INRAE), Morris Cindy (INRAE), Mougél Christophe (INRAE), Naud Olivier (INRAE), Rameau Catherine (INRAE), Reboud Xavier (INRAE), Ricroch Agnès (AgroParisTech), Rizzo Davide (UniLassalle), Roby Dominique (CNRS), Rolland Bernard (INRAE), Selloso Marc-André (MNHN), Simonin Marie (INRAE), Therond Olivier (INRAE), Verdier Jérôme (INRAE)

Tableau A.7. Membres du groupe d'experts sur la transition (chapitre 4) (France sauf précision)

Bujor Oana (UASVMB, Roumanie), Carlesi Stefano (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Ciceoi Roxana (UASVMB, Roumanie), Christensen Henriette (PAN Europe, Belgique), Lamine Claire (INRAE), Loconto Allison (INRAE), Matt Mireille (INRAE), Möhring Niklas (CNRS), Raineau Yann (INRAE), Robinson Douglas (INRAE)

Tableau A.8. Contribution des experts aux différentes étapes de l'analyse quantitative (chapitre 5) (France sauf précision)**Entretiens individuels**

Cheptea Angela (INRAE), De Clerck Fabrice (CGIAR, France, SRC, Suède), Gaigné Carl (INRAE), Guilpart Nicolas (AgroParisTech), Helming Katharina (Zalf, Allemagne), Jean Sébastien (Cnam et Cepii), Kesse-Guyot Emmanuelle (INRAE)

Atelier du 4 juillet 2022 (hypothèses d'évolution des rendements et des intensités culturales) et webinaire du 30 septembre 2022 (résultats de simulation des scénarios)

Aubertot Jean-Noël (INRAE), Barreiro-Hurle Jesus (JRC, Espagne), Bartoli-Kautsky Claudia (INRAE), Mitter Hermine (Boku, Autriche), Mosnier Aline (Fable consortium) Munier-Jolain Nicolas (INRAE)

Tableau A.9. Experts ayant participé aux ateliers dédiés aux études de cas régionales (chapitre 6)**Toscane (Italie)**

Carlesi Stefano (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie, coordinateur), Pecchioni Giovanni (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie, coordinateur), Antichi Daniele (Université de Pise-Unipi), Barberi Paolo (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Berti Giaime (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Bigi Alessandro (Cooperativa L'Unitaria), Bigongiali Federica (Fondazione Seminare il Futuro), Casanovi Luigi (Odaf), Cupelli Francesca (Società Cooperativa Agricola tra Produttori), Ferroni Franco (WWF Italie), Fontanelli Marco (Unipi), Gori Stefano (Confcooperative FedAgriPesca Toscana), Frascioni Christian (Unipi), Leoni Federico (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Mantino Alberto (école supérieure Sant'Anna de Pise, Italie), Nardi Giacomo (Odaf), Riccottoni Giovanni (Odaf), Tramacere Lorenzo (Unipi), Volpi Iride (Aedit)

Sud sud-est de la Roumanie (Roumanie)
Fintineru Gina (UASVM, coordinatrice), Lagunovschi Viorica (UASVM, coordinatrice), Butcaru Ana (UASVM, coordinatrice), Ciceoi Roxana (UASVM, animatrice de l'atelier), Bianca Zamfir (Genetic Resource Bank), Blaga Lucian (Fructavit SRL), Bogoescu Marian (Academy of Agricultural and Forestry Sciences), Bratu Camelia (Genetic Resource Bank), Bujor Oana (Research center for quality study of agri-food products), Certan Ion (Research center for quality study of agri-food products), Constantinescu Dan (Nasu Roșu), Dragoi Corlățan Marius (Andermatt SRL), Gabriel Corbu (Gradina corbilor), Gheorghe Coman (Enten System, sensors and crop monitoring equipment), Ivan Elena (Research center for quality study of agri-food products), Mihai Mihai (Peasant Mall), Sima Mihaela (Ilfov Agricultural Directorate), Stan Mihaela (Committee on Agriculture in the Chamber of Deputies), Stan Andreea (Research center for quality study of agri-food products), Stanciu Tudor (Beleza Store Srl), Serbuta Ciprian (Enviro-naturals), Teodor Joițaru (BioAgriCert), Tudor Cristi (Microgreens), Udriște Viorica (Green Agency)
Sud Finlande (Finlande)
Autio Sari (Tukes, coordinatrice), Laitala Emilia (Tukes, coordinatrice), Jalli Marja (Luke, coordinatrice), Anttila Heli (Tukes), Jern Tove (ministère de l'Agriculture et de la sylviculture Finlande), Kallio-Mannila Kaija (Tukes), Kämäri Tiiti (Häme University of Applied Sciences), Korkman Rikard (Ombudsman, Central Union of Swedish-speaking Farmers and Forest Owners), Lamminparras Aura (Finnish Organic Food Association Pro Luomu ry), Livonen Sari (Finnish Organic Research Institute), Malin Eliisa (Baltic Sea Action Group), Nevala Noora (Tukes), Pouta Eija (Luke), Roitto Marja (université d'Helsinki), Ronkainen Ari (Luke), Ruuttunen Pentti (Luke)
Participants additionnels impliqués dans les discussions post-atelier : Ahlberg Juho (Tukes), Jukkala Jaana (Tukes), Laamanen Tuija (Luke), Peltonen Sari (Pro agria)
Bergerac Duras (France)
Lelabousse Cécile (Interprofession des Vins de Bergerac et Duras, coordinatrice), De Rochambeau Hubert (INRAE, coordinateur), Raineau Yann (région Nouvelle-Aquitaine, VitiREV, INRAE, coordinateur), Darriet Philippe (Institut des Sciences de la Vigne et du Vin), Dayer Coralie (chambre d'agriculture de Dordogne), De Resseguier Laure (Bordeaux Sciences Agro), Duperré Daniel (Viticulteur), Elia Natacha (chambre d'agriculture de Gironde), Gouty-Borges Claire (INRAE), Haas Salomé (CAUE de la Dordogne), Lobry Christine (chambre d'agriculture de Dordogne), Salles Denis (INRAE), Vanquathem Mathilde (Interprofession des Vins de Bergerac et Duras)
Tableau A.10. Experts consultés pour l'analyse rétrospective des composantes du système (chapitres 3 et 4) (France sauf précision)
Structures agricoles
Balmann Alfons (Leibniz Institute of Agricultural Development in Transition Economies, Allemagne), Piet Laurent (INRAE)
Chaînes de valeur
Abdoun Elsa (UFC-Que Choisir), De Tilly Grégoire (La Ruche qui dit Oui !), Fardet Anthony (INRAE), Gassie Julia (CEP/Masa), Lepiller Olivier (Cirad), Perrot Jean-Luc (Pôle de compétitivité Valorial)
Politiques publiques
Christensen Henriette (PAN Europe, Belgique), Grimonprez Benoît (Université de Poitiers), Mantovani Alberto (Istituto Superiore di Sanita, Italie), Möhring Niklas (CNRS)

Tableau A.11. Participants à l'atelier (du 13 décembre 2021) sur les connaissances manquantes, experts des projets du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement » (chapitre 7) (France)

Aigrain Patrick (FranceAgriMer, *Vitae*), Barret Matthieu (IRHS, *Sucseed*), Brugière Françoise (FranceAgriMer, *Vitae*), Carpentier Alain (INRAE, *Fast*), Enjalbert Jérôme (INRAE, *Mobidiv*), Fadhuile Adelaïde (Université de Grenoble Alpes, *Fast*), Fugerey-Scarbel Aline (INRAE, *Mobidiv*), Gautier Hélène (INRAE, *Capzerophyto*), Hannin Hervé (SupAgro Montpellier, *Vitae*), Jacquet Florence (INRAE, coordinatrice scientifique du programme), Perchepped Laure (Université d'Angers, *Capzerophyto*), Poisson Anne-Sophie (Geves, *Sucseed*), Sauvion Nicolas (INRAE, *Beyond*), Scorsone Emmanuel (CEA, *Pherosensor*), Vailleau Fabienne (INP-Ensat, Deep impact)

Les acronymes des projets sont indiqués en italique.

Liste des auteurs

Auteurs principaux

Olivier Mora, DEPE, INRAE, Paris
Claire Meunier, DEPE, INRAE, Paris
Chantal Le Mouël, Smart, INRAE, Rennes
Jean-Louis Drouet, Ecosys, INRAE, Palaiseau
Jeanne-Alix Berne, DEPE, INRAE, Paris
Victor Kieffer, DEPE, INRAE, Paris
Lise Paresys, DEPE, INRAE, Paris
Agneta Forslund, Smart/Ecosocio, Rennes

Auteurs contributeurs

Jean-Noël Aubertot, Agir, INRAE, Toulouse
Bruno Chauvel, Agroécologie, INRAE, Dijon
Jérôme Enjalbert, GQE - Le Moulon, INRAE, Gif-sur-Yvette
Bernadette Julier, URP3F, INRAE, Lusignan
Melen Leclerc, IGEPP, INRAE, Rennes
Agnès Ricroch, Idest, université de Paris-Saclay, Sceaux
Emmanuelle Vaudour, Ecosys, INRAE, Palaiseau
Sari Autio, Tukes, Finlande
Ana Butcaru, UASVM, Bucarest, Roumanie
Stefano Carlesi, Center of Plant Sciences, école supérieure Sant'Anna, Pise, Italie
Roxana Ciceoi, UASVM, Bucarest, Roumanie
Hubert de Rochambeau, INRAE, Bordeaux
Gina Fintineru, UASVM, Bucarest, Roumanie
Marja Jalli, Luke, Finlande
Viorica Lagunovschi, UASVM, Bucarest, Roumanie

Emilia Laitala, Tukes, Finlande

Cécile Lelabousse, Interprofession des Vins de Bergerac et Duras, Bergerac

Giovanni Pecchioni, école supérieure Sant'Anna, Pise, Italie

Yann Raineau, Ettis, INRAE, Cestas

Bibliographie

- Agence BIO, 2020. Organic Farming and Market in the European Union. https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2020/04/Organic_farming_market_EU_2019.pdf
- Ait-Kaci Ahmed N., Dechamp-Guillaume G., Seassau C., 2020. Biofumigation to protect oilseed crops: focus on management of soilborne fungi of sunflower. *OCL (Oilseeds & fats Crops and Lipids)*, 27(59). DOI : 10.1051/ocl/2020052
- Akrich M., 1992. The De-scription of Technical Objects, in Law J.(ed.), *Shaping Technology/Building Society: Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press, Cambridge, MA, 205-224. <https://pedropeixotoferreira.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/03/akrich-the-de-scription-of-technical-objects.pdf>
- Albuquerque (de) M. B., dos Santos R. C., Lima L. M., Melo Filho P. D. A., Nogueira R. J. M. C., Da Câmara C. A. G., de Rezende Ramos A., 2011. Allelopathy, an alternative tool to improve cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 379-395. DOI : 10.1051/agro/2010031
- Alexandratos N., Bruinsma J., 2012. World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision. ESA Working paper N°12-03, Rome, FAO, Agriculture Development Economics Division. <https://www.fao.org/4/ap106e/ap106e.pdf>
- Aleksandrowicz L., Green R., Joy E. J., Smith P., Haines A., 2016. The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review. *PLoS One*, 11(11), e0165797. DOI : 10.1371/journal.pone.0165797
- Alliot C., Mc Adams-Marin D., Boriotto D., Baret P. V., 2022. The social costs of pesticide use in France. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1027583. DOI : 10.3389/fsufs.2022.1027583
- Álvarez A., Ritchey T., 2015. Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. *Acta Morphologica Generalis*, 4(1), 1-40. <https://www.swemorph.com/amg/pdf/amg-4-1-2015.pdf>
- Alves R., Perelman J., 2022. European mature adults and elderly are moving closer to the Mediterranean diet — a longitudinal study, 2013-19. *European Journal of Public Health*, 32(4), 600-605. DOI : 10.1093/eurpub/ckac070
- Alzamora S. M., López-Malo A., Tapia M. S., Welti-Chanes J., 2015. Minimally Processed Foods. *Encyclopedia of Food and Health*, 767-771. DOI : 10.1016/B978-0-12-384947-2.00470-0
- Amer M., Daim T. U., Jetter A., 2013. A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23-40. DOI : 10.1016/j.futures.2012.10.003
- Amichot M., Bertrand C., Chauvel B., et al., 2022. Spécificité du biocontrôle, in Leenhardt S., Mamy L., Pesce S., Sanchez W., et al. (coord.), *Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques, rapport de l'expertise scientifique collective — INRAE et Ifremer, France, 1041-1128*. <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-03777257/>
- Anchordoquy L., Aymonier A., Robin M.-H., 2022. Mélange variétal : Définition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. DOI : 10.17180/9fb6-9c59
- Anderies J., Ryan P., Walker B., 2006. Loss of Resilience, Crisis, and Institutional Change: Lessons from an Intensive Agricultural System in Southeastern Australia. *Ecosystems*, 9, 865-878. DOI : 10.1007/s10021-006-0017-1
- Annicchiarico P., Collins R. P., De Ron A. M., Firmat C., Litrico I., Hauggaard-Nielsen H., 2019. Chapter 3. Do we need specific breeding for legume-based mixtures? *Advances in Agronomy*, 157, 141-215. DOI : 10.1016/bs.agron.2019.04.001
- Ansani M., Fouilleux E., 2006. Changement de pratiques agricoles. Acteurs et modalités d'hybridation technique des exploitations laitières bretonnes. *Économie rurale*, 292, 3-17. DOI : 10.4000/economierurale.695
- Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), 2022. Avis révisé et rapport de l'Anses relatifs à l'évaluation des risques liés à la consommation de nitrates et de nitrites, rapport d'expertise collective, saisine 2020-SA-0106, Maison-Alfort, 306 p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2020SA0106Ra.pdf>
- Anten N. P., Alcalá-Herrera R., Schieving F., Onoda Y., 2010. Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major*. *New Phytologist*, 188(2), 554-564. DOI : 10.1111/j.1469-8137.2010.03379.x
- Anten N. P. R., Chen B. J. W., 2021. Detect thy family: Mechanisms, ecology and agricultural aspects of kin recognition in plants. *Plant Cell Environment*, 44(4), 1059-1071. DOI : 10.1111/pce.14011

- Anton S., Jacquin-Joly E., 2020. Médiateurs chimiques et luttes contre les insectes, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 221-228.
- Aouadi N., Macary F., Alonso Ugaglia A., 2020. Évaluation multicritère des performances socio-économiques et environnementales de systèmes viticoles et de scénarios de transition agroécologique. *Cahiers d'Agriculture*, 29(19). DOI : 10.1051/cagri/2020016
- Asioli D., Aschemann-Witzel J., Caputo V., Vecchio R., Annunziata A., Næs T., Varela P., 2017. Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International*, 99(Part 1), 58-71. DOI : 10.1016/j.foodres.2017.07.022
- Astlil J., Dara R. A., Campbell M., Farber J. M., Fraser E. D. G., Sharif S., Yada R. Y., 2019. Transparency in food supply chains: A review of enabling technology solutions. *Trends Food Science & Technology*, 91, 240-247. DOI : 10.1016/j.tifs.2019.07.024
- Attoumani-Ronceux A., Aubertot J.-N., Guichard L., Jouy L., Mischler P., Omon B., Petit M.-S., Pleyber E., Reau R., Seiler A., 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 SdCi. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/36495>
- Aubertot J. N., Barbier J. M., Carpentier A., Gril J.-J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (coord.), 2005a. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, expertise scientifique collective – synthèse du rapport, Inra et Cemagref, France, 64 p. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/synthese-expertise-68-pages.pdf>
- 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. (coord.), *L'agronomie aujourd'hui*, Versailles, éditions Quæ, 199-223.
- Aubertot J.-N., Savary S., Clerjeau M., et al., 2005b. Stratégies de protection des cultures, in Aubertot J. N., Barbier J. M., Carpentier A., Gril J.-J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (coord.), Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, expertise scientifique collective – synthèse du rapport, Inra et Cemagref, France, 64 p. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/synthese-expertise-68-pages.pdf>
- Ayoub K., Vigeant S., 2020. Can We Really Use Prices to Control Pesticides Use? Results from a Nonparametric Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 25, 885-900. DOI : 10.1007/s10666-020-09714-w
- Azzurra A., Massimiliano A., Angela M., 2019. Measuring sustainable food consumption: A case study on organic food. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 95-107. DOI : 10.1016/j.spc.2018.09.007
- Babikova Z., Gilbert L., Bruce T. J. A., Birkett M., Caulfield J. C., Woodcock C., Pickett J. A., Johnson D., 2013. Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. *Ecology Letters*, 16(7), 835-843. DOI : 10.1111/ele.12115
- Backer R., Rokem J. S., Ilangumar G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D. L., 2018. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. DOI : 10.3389/fpls.2018.01473
- Bais H. P., Vepachedu R., Gilroy S., Callaway R. M., Vivanco J. M., 2003. Allelopathy and Exotic Plant Invasion: From Molecules and Genes to Species Interactions. *Science*, 301(5638), 1377-1380. DOI : 10.1126/science.1083245
- Bajan B., Łukasiewicz J., Mrówczyńska-Kamińska A., Čechura L., 2022. Emission intensities of the food production system in the European Union countries. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132298. DOI : 10.1016/j.jclepro.2022.132298
- Bajwa W. I., Kogan M., 2004. Cultural Practices: Springboard to IPM, in Koul O., Dhaliwal G. S., Cuperus G. W., *Integrated Pest Management, Potential, Constraints and Challenges*, London (UK), CABI Publishing, 2, 21-38. DOI : 10.1079/9780851996868.0021
- Bakker L., van der Werf W., Tittone P. A., Wyckhuys K. A. G., Bianchi F. J. J. A., 2020. Neonicotinoids in global agriculture: evidence for a new pesticide treadmill? *Ecology & Society*, 25(3), 26. DOI : 10.5751/ES-11814-250326
- 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. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2020.106868
- Bakker P. A. H. M., Pieterse C. M. J., Jonge(de) R., Berendsen R. L., 2018. The Soil-Borne Legacy. *Cell*, 172(6), 1178-1180. DOI : 10.1016/j.cell.2018.02.024

- Balanza R., García-Lorda P., Pérez-Rodrigo C., Aranceta J., Bonet M., Salas-Salvadó J., 2007. Trends in food availability determined by the Food and Agriculture Organization's food balance sheets in Mediterranean Europe in comparison with other European areas. *Public Health Nutrition*, 10(2), 168-176. DOI : 10.1017/S1368980007246592
- Baldi I., Botton J., Chevrier C., Coumoul X., Elbaz A., Goujon S., Jouzel J.-N., Monnereau A., Multigner L., Salles B., Siroux V., Spinosi J., 2021. Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données, rapport de recherche, Inserm (Institut national de la santé et de la recherche médicale), collection Expertise collective, Montrouge, Éditions EDP Sciences, Inserm, 1036 p. <https://www.inserm.fr/wp-content/uploads/2021-07/inserm-expertise-collective-pesticides2021-rapportcomplet-0.pdf>
- Baldwin I. T., 2010. Plant volatiles. *Current Biology*, 20(9), R392-R397. DOI : 10.1016/j.cub.2010.02.052
- Balmann A., 1999. Path dependence and the structural evolution of family farm dominated regions, IX European Congress of Agricultural Economists, Organized Session Papers, August 24-28, Warsaw (Poland), 263-284.
- Balmann A., Dautzenberg K., Happe K., Kellermann K., 2006. On the Dynamics of Structural Change in Agriculture: Internal Frictions, Policy Threats and Vertical Integration. *Outlook on Agriculture*, 35(2), 115-121. DOI : 10.5367/00000006777641543
- Barbier J.-M., Constant N., Davidou L., Deliere L., Guisset M., Jacquet O., Lafond D., Panon M.-L., Sauvage D., 2011. CEPviti : co-conception de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires, Guide méthodologique construit dans le cadre du programme Écophyto 2018, rapport technique. <https://hal.inrae.fr/hal-02810893>
- Barbot G., Landel P.-A., Reydet S., 2020. Évolution de deux coopératives agricoles drômoises : entre tensions et ancrage territorial. *RIMHE : Revue Interdisciplinaire Management, Homme & Entreprise*, 40(9), 97-113. DOI : 10.3917/rimhe.040.0097
- Barbottin A., Chardigny J.-M., Chardot T., Charmet G., Debaeke P., Duc G., Fardet A., Jeuffroy M.-H., Lullien-Pellerin V., Magrini M.-B., Carvalho (de) M., Mouloungui Z., Renard M., Sebillotte C., 2018. Diversité des agricultures — le cas des filières céréales, oléagineux et légumineuses à graines. *Innovations Agronomiques*, 68, 39-77. DOI : 10.15454/VRRBGL
- Bardin M., Nicot P., 2020. L'utilisation des microorganismes comme produits de biocontrôle, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 151-160.
- Barilla, 2020. Good for you good for the planet — 2020 Sustainability report, 27 p. https://www.responsibilityreports.com/HostedData/ResponsibilityReportArchive/b/barilla_2020.pdf
- Barot S., Allard V., Cantarel A., Enjalbert J., Gaudreteau A., Goldringer I., Lata J.-C., Le Roux X., Niboyet A., Porcher E., 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(13). DOI : 10.1007/s13593-017-0418-x
- Barreiro-Hurlé J., Bogonos M., Himics M., Hristov J., Pérez-Domínguez I., Sahoo A., Salputra G., Weiss F., Baldoni E., Elleby C., 2021. Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI model. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy. EUR 30317 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg, 93 p. DOI : 10.2760/98160
- Barret M., et al., 2019. Succeed: Stop the Use of pesticides on Seeds by proposing alternatives, projet du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement », 2021-2027, 59 p.
- Barrett H. R., Browne A. W., Harris P. J. C., Cadore K., 2002. Organic certification and the UK market: organic imports from developing countries. *Food Policy*, 27(4), 301-318. DOI : 10.1016/S0306-9192(02)00036-2
- Barthélémy C., Bery P., Bureau-Point E., et al., 2022. Encadrement réglementaire de l'évaluation des risques et des impacts des produits phytopharmaceutiques, in Leenhardt S., Mamy L., Pesce S., et al. (coord.), Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques, rapport d'ESCO — résumé, INRAE et Ifremer, France, 15, 985-1040.
- Barto E. K., Weidenhamer J. D., Cipollini D., Rillig M. C., 2012. Fungal superhighways: do common mycorrhizal networks enhance below ground communication? *Trends in Plant Science*, 17(11), 633-637. DOI : 10.1016/j.tplants.2012.06.007
- Bartoli C., Roux F., Lamichhane J. R., 2016. Molecular mechanisms underlying the emergence of bacterial pathogens: an ecological perspective. *Molecular Plant Pathology*, 17(2), 303-310. DOI : 10.1111/mpp.12284

- Barzman M., Bàrberi P., Birch A. N. E., Boonekamp P., Dachbrodt-Saaydeh S., Graf B., Hommel B., Jensen J. E., Kiss J., Kudsk P., Lamichhane J. R., Messéan A., Moonen A.-C., Ratnadass A., Ricci P., Sarah J.-L., Sattin M., 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for sustainable development*, 35(4), 1199-1215. DOI : 10.1007/s13593-015-0327-9
- Basic, Greenpeace, WWF, 2021. Étude de démarches de durabilité dans le domaine alimentaire, rapport d'analyse transverse, 58 p. https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2021-09/Etude-demarches-durabilites-GREENPEACE_WWF-BASIC.pdf
- Batáry P., Báldi A., Kleijn D., Tschamtké T., 2011. Landscape-moderated biodiversity effects of agri-environmental management: a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1713), 1894-1902. DOI : 10.1098/rspb.2010.1923
- Battisti A., 2008. Forests and climate change. Lessons from insects. *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 1, 1-5. DOI : 10.3832/ifor0210-0010001
- Bauer M. V., Marx C., Bauer F. V., Flury D. M., Ripken T., Streit B., 2020. Thermal weed control technologies for conservation agriculture — a review. *Weed Research*, 60(4), 241-250. DOI : 10.1111/wre.12418
- Bazoche P., Carpentier A., Fadhuile A., Femenia F., Gendre C., Grimonprez B., Hannachi M., Jacquet F., Jouan J., Sauquet A., Subervie J., Thoyer S., 2022. Les leviers politiques et organisationnels, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord.), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 196-201. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Bedoussac L., Journet E.-P., 2022. Culture associée : Définition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. DOI : 10.17180/0h8x-a774
- Beillouin D., Ben-Ari T., Malézieux E., Seufert V., Makowski D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697-4710. DOI : 10.1111/gcb.15747
- Bellon-Maurel V., Huyghe C., 2017. Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *OCL*, 24(3), D307. DOI : 10.1051/ocl/2017028
- Beltran-García M. J., Martínez-Rodríguez A., Olmos-Arriaga I., Valdes-Salas B., Di Mascio P., White J. F., 2021. Nitrogen fertilization and stress factors drive shifts in microbial diversity in soils and plants. *Symbiosis*, 84, 379-390. DOI : 10.1007/s13199-021-00787-z
- Benhamou N., Rey P., 2012. Elicitors of natural plant defense mechanisms: a new management strategy in the context of sustainable production. *Phytoprotection*, 92(1), 24-35. DOI : 10.7202/1013299ar
- Bennett T., 2021. Plant-plant interactions. *Plant, Cell & Environment*, 44(4), 995-996. DOI : 10.1111/pce.14030
- Berg G., Grube M., Schloter M., Smalla K., 2014. Unraveling the plant microbiome: Looking back and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 5, 1-7. DOI : 10.3389/fmicb.2014.00148
- Bergerman M., Billingsley J., Reid J., van Henten E., 2016. Robotics in Agriculture and Forestry, in Siciliano B., Khatib O. (eds), *Springer Handbook of Robotics*, 2nd Edition, Springer International Publishing, 1463-1492. DOI : 10.1007/978-3-319-32552-1_56
- Bernardo L., Morcia C., Carletti P., Ghizzoni R., Badeck F. W., Rizza F., Lucini L., Terzi V., 2017. Proteomic insight into the mitigation of wheat root drought stress by arbuscular mycorrhizae. *Journal of Proteomics*, 169, 21-32. DOI : 10.1016/j.jprot.2017.03.024
- Bézat C., Quenu H., Martin G., 2022. Rotation des cultures : Définition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. DOI : 10.17180/ma4v-mf26
- Bianchi F. J. J. A., Booij C. J. H., Tschamtké T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273, 1715-1727. DOI : 10.1098/rspb.2006.3530
- Biedrzycki M. L., Jilany T. A., Dudley S. A., Bais H. P., 2010. Root exudates mediate kin recognition in plants. *Communicative & Integrative Biology*, 3(1), 28-35. DOI : 10.4161/cib.3.1.10118
- Bieroza M. Z., Bol R., Glendell M., 2021. What is the deal with the Green Deal: Will the new strategy help to improve European freshwater quality beyond the Water Framework Directive? *Science of The Total Environment*, 791, 148080. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2021.148080
- Bignebat C., Delame N., Hugonnet M., Legagneux B., Nguyen T. B. P., Piet L., 2019. Trois tendances structurantes : concentration, sous-traitance et diversification des exploitations, in ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, *ActifAgri, Transformations des emplois et des activités en agriculture*. La Documentation française, 30-47. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02437659/document>

- Bijman J., Iliopoulos C., 2014. Farmers' cooperatives in the EU: Policies, strategies and organization. *Annals of Public and Cooperative Economics*, 85(4), 497-508. DOI : 10.1111/apce.12048
- Bilas R. D., Bretman A., Bennett T., 2021. Friends, neighbours and enemies: an overview of the communal and social biology of plants. *Plant, Cell & Environment*, 44(4), 997-1013. DOI : 10.1111/pce.13965
- Biocoop, 2018. Cahier des charges général Biocoop, 1-21.
- Birke F. M., Bae S., Schober A., Wolf S., Gerster-Bentaya M., Knierim A., 2022. AKIS in European countries: Cross analysis of AKIS country from the I2connect project. 57 p. https://i2connect-h2020.eu/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-02-AKIS-cross-analysis_updated.pdf
- Birt C., Buzeti T., Grosso G., Justesen L., Lachat C., Lafronconi A., Mertanen E., Rangelov N., Sarlio Lähteenkorva S., 2017. Healthy and Sustainable Diets for European Countries. European Public Health Association, 88 p. https://eupha.org/repository/advocacy/EUPHA_report_on_healthy_and_sustainable_diets_20-05-2017.pdf
- Blasi E., Fosci L., Martella A., Ronchi C., Mora G., 2019. How do bakery value chain downstream actors pull farmers to diversify their cropping systems? The Mulino Bianco® Italian brand case study, Book of abstracts, First European Conference on Crop Diversification, September 18-21, Budapest (Hungary), 322-323. DOI : 10.5281/zenodo.3516329
- Bliss K., Bickler C., Villa A., Tippin L., Vieweger A., Meldrum J., Padel S., Pearce B., Lea M., 2019. Getting out of the commodity trap: Enabling diversity through alternative food networks, Book of abstracts, First European Conference on Crop Diversification, September 18-21, Budapest (Hungary), 310-311. DOI : 10.5281/zenodo.3516328
- Böcker T., Finger R., 2016. European Pesticide Tax Schemes in Comparison: An Analysis of Experiences and Developments. *Sustainability*, 8(4), 378. DOI : 10.3390/su8040378
- Bodirsky B. L., Dietrich J. P., Martinelli E., Stenstad A., Pradhan P., Gabrys S., Mishra A., Weindl I., Le Mouél C., Rolinski S., Baumstark L., Wang X., Waid J. L., Lotze-Campen H., Popp A., 2020. The ongoing nutrition transition thwarts long-term targets for food security, public health and environmental protection. *Scientific Reports*, 10, 19778. DOI : 10.1038/s41598-020-75213-3
- Boetzl F. A., Krauss J., Heinze J., Hoffmann H., Juffa J., König S., Krimmer E., Prante M., Martin E. A., Holzschuh A., Steffan-Dewenter I., 2021. A multitaxa assessment of the effectiveness of agri-environmental schemes for biodiversity management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118, 1-9. DOI : 10.1073/pnas.2016038118
- Boinet S., Mony C., Fried G., Ernoult A., Aviron S., Ricono C., Couthous E., Alignier A., 2022. Weed communities are more diverse, but not more abundant, in dense and complex bocage landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 60(1), 4-16. DOI : 10.1111/1365-2664.14312
- Bonato M., Martin E. A., Cord A. F., Seppelt R., Beckmann M., Strauch M., 2023. Applying generic landscape-scale models of natural pest control to real data: associations between crops, pests and biocontrol agents make the difference. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108215. DOI : 10.1016/j.agee.2022.108215
- Bonnefoy N., 2012. Pesticides : vers le risque zéro, rapport d'information n°42, tome I, Paris (France), Sénat, 348 p. <https://www.senat.fr/rap/r12-042-1/r12-042-10.html#toc26>
- Bonnin I., Bonneuil C., Goffaux R., Montalent P., Goldringer I., 2014. Explaining the decrease in the genetic diversity of wheat in France over the 20th century. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 195, 183-192. DOI : 10.1016/j.agee.2014.06.003
- Borg J., Kiær L. P., Lecarpentier C., Goldringer I., Gauffreteau A., Saint-Jean S., Barot S., Enjalbert J., 2018. Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research*, 221, 298-313. DOI : 10.1016/j.fcr.2017.09.006
- Borowiec N., Sforza R. F. H., 2020. Lutte biologique par acclimatation, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquín-Joly E., Malausa T., Lannou C., *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 49-61.
- Bourguet D., Guillemaud T., 2016. The Hidden and External Costs of Pesticide Use, in Lichtfouse E (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*, 19, 35-120. DOI : 10.1007/978-3-319-26777-7_2
- Bourguignon D., 2017. Politique et législation de l'UE sur les pesticides : Produits phytopharmaceutiques et biocides, analyse approfondie, Service de recherche du Parlement européen. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_IDA\(2017\)599428](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_IDA(2017)599428)
- Bournigal J.-M., 2014. Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements, rapport de la Mission Agroéquipements, Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture), Antony (France), 150 p. <https://www.vie-publique.fr/files/rapport/pdf/154000034.pdf>
- Bournigal J.-M., 2016. AgGate — Portail de données pour l'innovation en agriculture, rapport, Irstea, Antony (France), 138 p. <https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/rapport-portail-de-donnees-agricoles.pdf>

- Bousset L., 2020. Épidémies sur les cultures, dans les agroécosystèmes, in Bousset L., Maladie de la plante, Épidémies, Résistance génétique, Adaptation et Tactiques : Schéma et descriptions pour mieux comprendre ces notions dans les agroécosystèmes, document de travail, INRAE, Le Rheu (France), 55 p.
- Bout A., Ris N., Multeau C., Mailleret L., 2020. Lutte biologique par augmentation à l'aide d'arthropodes entomophages, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C., *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 63-73.
- Bregaglio S., Donatelli M., Confalonieri R., 2013. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030-2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 767-776. DOI : 10.1007/s13593-013-0149-6
- Bremmer J., Gonzalez-Martinez A., Jongeneel R., Huiting H., Stokkers R., Ruijs M., 2021. Impact assessment of EC 2030 Green Deal Targets for sustainable crop production, report 2021-150, Wageningen Economic Research, Wageningen. DOI : 10.18174/558517
- Bresciani A., Pagani M. A., Marti A., 2022. Pasta-Making Process: A Narrative Review on the Relation between Process Variables and Pasta Quality. *Foods*, 11(3), 256. DOI : 10.3390/foods11030256
- Bretagnolle V., Gaba S., 2015. Weeds for bees? A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 891-909. DOI : 10.1007/s13593-015-0302-5
- Briassoulis D., Babou E., Hiskakis M., Scarascia G., Picuno P., Guarde D., Dejean C., 2013. Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe. *Waste Management & Research*, 31(12), 1262-1278. DOI : 10.1177/0734242X13507968
- Brice L., Mallard A., 2020. Introduction Labels in Economic and Political Life: Studying Labelling in Contemporary Markets, in Laurent B., Mallard A. (eds), *Labelling the Economy. Qualities and Values in Contemporary Markets*, Singapore (Singapore), Palgrave Macmillan Singapore, 1-31. DOI : 10.1007/978-981-15-1498-2_1
- Bryant Christie Inc., 2017. Estimation of Potentially Affected Agricultural Imports Due to Hazard-Based Criteria in the EU Regulation of Plant Protection Products, Part I, Analysis by Region and Product Group, prepared for the European Crop Protection Association. <https://croplifeurope.eu/wp-content/uploads/2021/03/Bryant-Christie-Report-Estimation-of-Affected-Imports-Hazard-criteria.pdf>
- Buckwell A., De Wachter E., Nadeu E., Williams A., 2020. Crop Protection & the EU Food System. Where are they going? RISE Foundation, Brussels (Belgium). https://risefoundation.eu/wp-content/uploads/2020/07/2020_RISE_CP_EU_final.pdf
- Busch L., 2020. Contested terrain: The ongoing struggles over food labels, standards and standards for labels, in Laurent B., Mallard A. (eds), *Labelling the Economy. Qualities and Values in Contemporary Markets*, Singapore (Singapore), Palgrave Macmillan Singapore, 33-58. DOI : 10.1007/978-981-15-1498-2_2
- Busson M., Chetty J., Robin M.-H., Aubertot J.-N., 2022. Biocontrôle : Définition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. <https://dicoagroecologie.fr/en/dictionnaire/biocontrol/>
- Butault J.-P., Delame N., Jacquet F., Rio P., Zardet G., Benoit M., Blogowski A., Bouhsina Z., Carpentier A., Desbois D., Dupraz P., Guichard L., Rousselle J.-M., Ruas J.-F., Varchavsky M., 2009. EcoPhyto R&D : Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires. Volet 1. Tome VI : analyse *ex ante* de scénarios de rupture dans l'utilisation des pesticides, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, 90 p. DOI : 10.17180/s007-3h36
- Butterworth M. H., Semenov M. A., Barnes A., Moran D., West J. S., Fitt B. D. L., 2010. North-south divide: Contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(42), 123-130. DOI : 10.1098/rsif.2009.0111
- Calo J. R., Crandall P. G., O'Bryan C. A., Ricke S. C., 2015. Essential oils as antimicrobials in food systems - A review. *Food Control*, 54, 111-119. DOI : 10.1016/j.foodcont.2014.12.040
- Callon M., 1984. Some Elements of a Sociology of Translation: Domestication of the Scallops and the Fishermen of St Brieuç Bay. *The Sociological Review*, 32(1), 196-233. DOI : 10.1111/j.1467-954X.1984.tb00113.x
- Callon M., 1986. Éléments pour une sociologie de la traduction : la domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc. *L'Année sociologique*, 36, 169-208. <https://www.proquest.com/openview/8a4d56f75c3e6b4f9011622b651a0812/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1818271>
- Candemir A., Duvaléix S., Latruffe L., 2021. Agricultural cooperatives and farm sustainability — A literature review. *Journal of Economic Surveys*, 35(4), 1118-1144. DOI : 10.1111/joes.12417
- Cardona A., Brives H., Lamine C., Godet J., Gouttenoire L., Rénier L., 2021. Les appuis de l'action collective mobilisés dans les transitions agroécologiques. Enseignements de l'analyse de cinq collectifs d'agriculteurs en Rhône-Alpes. *Cahiers Agricultures*, 30(21). DOI : 10.1051/cagri/2021007

- Carocho M., Barreiro M. F., Morales P., Ferreira I. C. F. R. 2014. Adding Molecules to Food, Pros and Cons: A Review on Synthetic and Natural Food Additives. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 13(4), 377-99. DOI : 10.1111/1541-4337.12065
- Carof M., Laperche A., Cannavo P., Menasseri-Aubry S., Godinot O., Jubault M., Manzaneres-Dauleux M. M., Guénon R., Jaffrezic A., Peres G., Le Cadre-Barthélémy E., 2018. Valorisation des interactions plante-sol pour la nutrition et la santé des plantes. *Innovations Agronomiques*, 69, 71-82. DOI : 10.15454/D8RT59
- Carr P. M., 2017. Guest Editorial: Conservation Tillage for Organic Farming. *Agriculture*, 7(3), 19. DOI : 10.3390/agriculture7030019
- Carrefour, 2019. Annual report. https://www.carrefour.com/sites/default/files/2020-07/Carrefour_RA2019_EN_280520_1.pdf
- Carson R. L., Gravrand J. F. (trad.), Heim R. (préface), 1963. *Le Printemps silencieux*. Plon.
- Cecchini M., Warin L., 2016. Impact of food labelling systems on food choices and eating behaviours: A systematic review and meta-analysis of randomized studies. *Obesity Reviews*, 17(3), 201-210. DOI : 10.1111/obr.12364
- Cellier V., Berthier A., Colnenne-David C., Darras S., Deytieu V., Savoie A., Aubertot J.-N., 2018. Évaluation multi-critère de systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage (Réseau RésOPest). *Innovations Agronomiques*, 70, 273-289. DOI : 10.15454/y8fy5s
- Chaplin-Kramer R., O'Rourke M. E., Blitzer E. J., Kremen C., 2011. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 14, 922-932. DOI : 10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x
- Chatellier V., Gaigné C., 2012. Les logiques économiques de la spécialisation productive du territoire agricole français. *Innovations Agronomiques*, 22, 185-203. <https://hal.science/hal-01208860v1>
- Chauvel B., Derroux D., Munier-Jolain N., Cordeau S., 2018. Gestion de la flore adventice en semis direct sous couvert, in Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 207-220.
- Chauvel B., Guillemain J.-P., Gasquez J., Gauvrit C., 2012. History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Protection*, 42, 320-326. DOI : 10.1016/j.cropro.2012.07.011
- Cherr C. M., Scholberg J. M. S., McSorley R., 2006. Green Manure Approaches to Crop Production: A Synthesis. *Agronomy Journal*, 98(2), 302-319. DOI : 10.2134/agronj2005.0035
- Chirurgiu I.-A., Fulgeanu D.-F., 2019. Dynamics of vegetable agricultural production in Giurgiu county, Romania. *Scientific Papers, Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 19(4). http://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.19_4/Art6.pdf
- CIPV Secrétariat (Convention internationale pour la protection des végétaux), 2021. Examen scientifique des effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux : un défi mondial à relever afin de prévenir et d'atténuer les risques phytosanitaires dans l'agriculture, la sylviculture et les écosystèmes, FAO pour le compte du Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux, Rome (Italie), 32 p. DOI : 10.4060/cb4769fr
- Clough Y., Kirchwegger S., Kantelhardt J., 2020. Field sizes and the future of farmland biodiversity in European landscapes. *Conservation Letters*, 13(6), e12752. DOI : 10.1111/conl.12752
- Coceral, Euromaisiers, Euromalt and Unistock, 2018. Applied methods for insect management in stored grain and oilseeds. Results of the storage insecticides survey carried out by Coceral, Euromaisiers, Euromalt and Unistock. http://www.coceral.com/data/1519833949Storage%20insecticides_report%202018.pdf
- Cochet H., 2018. Capital/Labour separation in French agriculture: The end of family farming? *Land Use Policy*, 77, 553-558. DOI : 10.1016/j.landusepol.2018.05.062
- Colbach N., Vacher C., 2014. Travail du sol et gestion de la flore adventice, in Labreuche J., Laurent F., Roger-Estrade J. (coord.), *Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 113-125.
- Colnenne-David C., Jeuffroy M.-H., Grandeau G., Doré T., 2023. Pesticide-free arable cropping systems: performances, learnings, and technical lock-ins from a French long-term field trial. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(81). DOI : 10.1007/s13593-023-00931-7
- Conrath U., Beckers G. J. M., Flors V., García-Agustín P., Jakab G., Mauch F., Newman M.-A., Pieterse C. M. J., Poinssot B., Pozo M. J., Pugin A., Schaffrath U., Ton J., Wendeheime D., Zimmerli L., Mauch-Mani B., 2006. Priming: Getting Ready for Battle. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(10), 1062-1071. DOI : 10.1094/MPMI-19-1062
- Corcellas C., Eljarrat E., Barceló D., 2015. First report of pyrethroid bioaccumulation in wild river fish: a case study in Iberian river basins (Spain). *Environment International*, 75, 110-116. DOI : 10.1016/j.envint.2014.11.007

- Cordeau S., Triolet M., Wayman S., Steinberg C., Guillemain J.-P., 2016. Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. *Crop Protection*, 87, 44-49. DOI : 10.1016/j.cropro.2016.04.016
- Cosme M., Fernández I., Van der Heijden M. G., Pieterse C. M., 2018. Non-Mycorrhizal Plants: The Exceptions that Prove the Rule. *Trends in Plant Science*, 23(7), 577-587. DOI : 10.1016/j.tplants.2018.04.004
- Coutand C., Chevolut M., Lacoïnte A., Rowe N., Scotti I., 2010. Mechanosensing of stem bending and its interspecific variability in five neotropical rainforest species. *Annals of Botany*, 105(2), 341-347. DOI : 10.1093/aob/mcp286
- Coutand C., Moulia B., 2000. Biomechanical study of the effect of a controlled bending on tomato stem elongation: Local strain sensing and spatial integration of the signal. *Journal of Experimental Botany*, 51(352), 1825-1842. DOI : 10.1093/jexbot/51.352.1825
- Cowan R., Gunby P., 1996. Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies. *The Economic Journal*, 106(436), 521-542. DOI : 10.2307/2235561
- Cravero M. C., 2019. Organic and biodynamic wines quality and characteristics: A review. *Food Chemistry*, 295, 334-340. DOI : 10.1016/j.foodchem.2019.05.149
- Daniłowska A., 2018. Changes in European Union farm structure and their multinational implications. *Oeconomia*, 17(4), 31-40. DOI : 10.22630/ASPE.2018.17.4.49
- Darnhofer I., 2010. Strategies of family farms to strengthen their resilience. *Environmental Policy and Governance*, 20(4), 212-222. DOI : 10.1002/eet.547
- Darnhofer I., 2014. Resilience and why it matters for farm management. *European Review of Agricultural Economics*, 41(3), 461-484. DOI : 10.1093/erae/jbu012
- Darnhofer I., 2021. Farming Resilience: From Maintaining States towards Shaping Transformative Change Processes. *Sustainability*, 13(6), 3387. DOI : 10.3390/su13063387
- Darnhofer I., Bellon S., Dedieu B., Milestad R., 2008. Adaptive farming systems — A position paper, European International Farming Systems Association (Ifsa) Symposium, July 2008, Clermont-Ferrand, France, 14 p. <https://hal.science/hal-01195146v1>
- Dasaklis T. K., Voutsinas T. G., Tsoulfas G. T., Casino F., 2022. A Systematic Literature Review of Blockchain-Enabled Supply Chain Traceability Implementations. *Sustainability*, 14(4), 1-30. DOI : 10.3390/su14042439
- Dawson J. C., Goldberger J. R., 2008. Assessing farmer interest in participatory plant breeding: Who wants to work with scientists? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(3), 177-187. DOI : 10.1017/S1742170507002141
- Dawson J. C., Goldringer I., 2011. Breeding for Genetically Diverse Populations: Variety Mixtures and Evolutionary Populations, in Lammerts van Bueren L. T., Myers J. R. (eds), *Organic Crop Breeding*, Hoboken (USA), John Wiley & Sons Inc, 77-98. DOI : 10.1002/9781119945932.ch5
- Dean M., Shepherd R., Arvola A., Vassallo M., Winkelmann M., Claupein E., Lähteenmäki L., Raats M. M., Saba A., 2007. Consumer perceptions of healthy cereal products and production methods. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 188-196. DOI : 10.1016/j.jcs.2007.06.007
- Deguine J.-P., Aubertot J.-N., Bellon S., Côte F., Lauri P.-E., Lescouret F., Ratnadass A., Scopel E., Andrieu N., Bâberri P., Becker N., Bouyer J., Brévault T., Cerdan C., Cortesero A.-M., Dangles O., Delatte H., Dinh P. T. Y., Dreyer H., Duru M., Flor R. J., Gardarin A., Husson O., Jacquot M., Javelle A., Justes E., Lam M. T. X., Launay M., Van Le V., Longis S., Martin J., Munier-Jolain N., Nguyen N. T. T., Ngoc Nguyen T. T., Penvern S., Petit S., Poisot A.-S., Robin M.-H., Rolland B., Rusch A., Sabourin E., Sanguin H., Sarthou J.-P., Sester M., Simon S., Sourisseau J.-M., Steinberg C., Tchamitchian M., Thoumazeau A., Tibi A., Tivet F., Tixier P., Trinh X. T., Vialatte A., Wyckhuys K., Lamichhane J. R., 2023. Agroecological crop protection for sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*, 178, 1-59. DOI : 10.1016/bs.agron.2022.11.002
- Deguine J.-P., Aubertot J.-N., Flor R. J., Lescouret F., Wyckhuys K. A., Ratnadass A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 38. DOI : 10.1007/s13593-021-00689-w
- Deguine J.-P., Ferron P., Russell D., 2009. *Crop Protection: from Agrochemistry to Agroecology*, Boca Raton (USA), CRC Press, 216 p.
- Deguine J.-P., Ledouble H., 2022. Le biocontrôle en France : de quoi parle-t-on? *Cahiers d'Agricultures*, 31, 19. DOI : 10.1051/cagri/2022018
- Deguine J.-P., Ratnadass A., 2017. Agroecological Crop Protection: At the Interface Between Agroecology, Crop Protection and Biodiversity Management, in Deguine J.-P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.-N., *Agroecological Crop Protection*, Versailles, éditions Quæ, Springer, 33-46.

- Delanoue E., Roguet C., 2015. Acceptabilité sociale de l'élevage en France : controverses et remises en cause sur l'élevage, regards croisés de différents acteurs de la société. *Inra Productions Animales*, 28(1), 39-50. DOI : 10.20870/productions-animales.2015.28.1.3009
- Delavaux C. S., Smith-Ramesh L. M., Kuebbing S. E., 2017. Beyond nutrients: A meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils. *Ecology*, 98(8), 2111-2119. DOI : 10.1002/ecy.1892
- Delcour I., Spanoghe P., Uyttendaele M., 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68, 7-15. DOI : 10.1016/j.foodres.2014.09.030
- Delière L., Schneider C., Audeguin L., Le Cunff L., Cailliatte R., Prado E., Onimus C., Demeaux I., Guimier S., Fabre F., Delmotte F., 2017. Cépages résistants : la vigne contre-attaque ! *Phytoma*, 708, 34-37. <https://hal.inrae.fr/hal-02624596>
- Deng Y., Zhai K., Xie Z., Yang D., Zhu X., Liu J., Wang X., Qin P., Yang Y., Zhang G., Li Q., Zhang J., Wu S., Milazzo J., Mao B., Wang E., Xie H., Tharreau D., He Z., 2017. Epigenetic regulation of antagonistic receptors confers rice blast resistance with yield balance. *Science*, 355(6328), 962-965. DOI : 10.1126/science.aai8898
- De Schutter O., Jacobs N., Clément C., 2020. A 'Common Food Policy' for Europe: How governance reforms can spark a shift to healthy diets and sustainable food systems. *Food Policy*, 96, 101849. DOI : 10.1016/j.foodpol.2020.101849
- Desmedt W., Vanholme B., Kyndt T., 2021. Plant defense priming in the field: a review, in Maiefisch P., Mangelinckx S. (eds), *Recent Highlights in the Discovery and Optimization of Crop Protection Products*, Academic Press, 87-124. DOI : 10.1016/B978-0-12-821035-2.00045-0
- Desprez-Loustau M. L., Aguayo J., Dutech C., Hayden K. J., Husson C., Jakushkin B., Marçais B., Piou D., Robin C., Vacher C., 2016. An evolutionary ecology perspective to address forest pathology challenges of today and tomorrow. *Annals of Forest Science*, 73(1), 45-67. DOI : 10.1007/s13595-015-0487-4
- Diekötter T., Wamser S., Dörner T., Wolters V., Birkhofer K., 2016. Organic farming affects the potential of a granivorous carabid beetle to control arable weeds at local and landscape scales. *Agricultural and Forest Entomology*, 18(2), 167-173. DOI : 10.1111/afe.12150
- Dokova K. G., Pancheva R. Z., Usheva N. V., Haralanova G. A., Nikolova S. P., Kostadinova T. I., Egea Rodrigues C., Singh J., Illner A.K., Aleksandrova K., 2022. Nutrition Transition in Europe: East-West Dimensions in the Last 30 Years-A Narrative Review. *Frontiers in Nutrition*, 9. DOI : 10.3389/fnut.2022.919112
- Donnars C., Lattre-Gasquet (de) M., Marzin J., Piet L., 2018. Farm Structures: Current Shaping Forces and Future Farms, in Le Mouël C., Lattre-Gasquet (de) M., Mora O. (eds), *Land Use and Food Security in 2050: a Narrow Road. Agrimonde-Terra*, Versailles, éditions Quæ, 155-178. <https://hal.inrae.fr/hal-02926355v1>
- Doole G. J., Pannell D. J., 2008. Role and value of including lucerne (*Medicago sativa* L.) phases in crop rotations for the management of herbicide-resistant *Lolium rigidum* in Western Australia. *Crop Protection*, 27(3-5), 497-504. DOI : 10.1016/j.cropro.2007.07.018
- Döring J., Collins C., Frisch M., Kauer R., 2019. Organic and Biodynamic Viticulture Affect Biodiversity and Properties of Vine and Wine: A Systematic Quantitative Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 70(3), 221-242. DOI : 10.5344/ajev.2019.18047
- Doyle N., Dave D., Kelly I., 2016. Global Evidence on Obesity and Related Outcomes: An Overview of Prevalence, Trends, and Determinants. *Eastern Economic Journal*, 42, 7-28. DOI : 10.1057/eej.2014.37
- Duchene O., Vian J.-F., Celette F., 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 148-161. DOI : 10.1016/j.agee.2017.02.019
- Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B., Chen W.-H., Cielniak G., Cleaversmith J., Dai J., Davis S., Fox C., From P., Georgilas I., Gill R., Gould I., Hanheide M., Hunter A., Iida F., Mihalyyova L., Nefiti-Meziani S., Neumann G., Paoletti P., Pridmore T., Ross D., Smith M., Stoelen M., Swainson M., Wane S., Wilson P., Wright I., Yang G.-Z., 2018. Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture, UK-RAS White papers, 36 p. DOI : 10.48550/arXiv.1806.06762
- Durance P., Godet M., 2010. Scenario building: Uses and abuses. *Technological forecasting and social change*, 77(9), 1488-1492. DOI : 10.1016/j.techfore.2010.06.007
- Duval L., Binet T., Colle A., Dupraz P., Pech M., Martin I., 2019. Guide à destination des services de l'État et de ses opérateurs : déployer des paiements pour services environnementaux en agriculture, Étude réalisée pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Paris, 47 p. https://vertigolab.eu/wp-content/uploads/2020/07/etude_pse_guide_prives_vf-1.pdf

- EC (European Commission), 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, OJ L327, 22.12.2000, European Commission, Brussels (Belgium). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32000L0060>
- EC, 2010. Commission Decision of 10 June 2010 on guidelines for the calculation of land carbon stocks for the purpose of Annex V to Directive 2009/28/EC. *Official Journal of the European Union*, Luxembourg (Belgium), 23 p. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:151:0019:0041:EN:PDF>
- EC, 2013a. Structure and dynamics of EU farms: changes, trends and policy relevance, DG Agriculture and Rural Development, EU Agricultural Economics Briefs, 9, Directorate-General for Agriculture and Rural Development, European Commission. <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/283654/>
- EC, 2013b. How many people work in agriculture in the European Union? An answer based on Eurostat data sources, EU Agricultural Economics Briefs, 8. https://agridata.ec.europa.eu/Qlik_Downloads/08_en.pdf
- EC, 2014. The economic impact of modern retail on choice and innovation in the EU food sector — Final report, Brussels (Belgium), 452 p. DOI : 10.2763/77405
- EC, 2015. You are part of the food chain — Key facts and figures on the food supply chain in the European Union, EU Agricultural Markets Briefs, n°4, 7 p. https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/bd8b1bbe-1b81-4f7b-8371-ea4beba14c03_en?filename=agri-market-brief-04_en.pdf
- EC, 2018. Study supporting the REFIT Evaluation of the EU legislation on plant protection products and pesticides residues (Regulation (EC) n°1107/2009 and Regulation (EC) n°396/2005) — Final report, Publications Office. DOI : 10.2875/863905
- EC, 2019a. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal, COM/2019/640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640>
- EC, 2019b. Organic farming in the EU — A fast growing sector, EU Agricultural Markets Briefs, 13, Brussels (Belgium), 12 p. https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/6db99f91-279b-4a84-83e9-0fc5cbf16a30_en?filename=market-brief-organic-farming-in-the-eu_mar2019_en.pdf
- EC, 2020a. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions: A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. COM/2020/381 final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0381>
- EC, 2020b. Commission Staff Working Document — Commission recommendations for Italy's CAP strategic plan accompanying the document "Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions", Recommendations to the Member States as regards their strategic plan for the Common Agricultural Policy, SWD/2020/396 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0396>
- EC, 2020c. Commission Staff Working Document — Commission's recommendations for Finland's CAP strategic plan accompanying the document "Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions", SWD/2020/376 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0376>
- EC, 2020d. Commission Staff Working Document — Commission recommendations for Romania's CAP strategic plan accompanying the document "Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions", Recommendations to the Member States as regards their strategic plan for the Common Agricultural Policy, SWD/2020/391 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0391>
- EC, 2020e. Special Eurobarometer 505. Making our food fit for the future — Citizens' expectations, Brussels (Belgium), 124 p. DOI : 10.2875/826903
- EC, 2021a. Statistical Factsheet — Finland, DG Agriculture and Rural Development, Farm Economics Unit, 18 p. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2021-12/agri-statistical-factsheet-fi_en_0.pdf
- EC, 2021b. Trends in Harmonised Risk Indicators for the European Union. https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides/harmonised-risk-indicators/trends-eu_en
- EC, 2022d. Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the Application of EU health and environmental standards to imported agricultural and agri-food products, COM/2022/226 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0226>

- ECA (European Court of Auditors), 2020. Sustainable use of plant protection products: limited progress in measuring and reducing risks, Special report, 49 p. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_05/SR_Pesticides_EN.pdf
- Echa (European Chemicals Agency) and Efsa (European Food Safety Authority) with the technical support of JRC (Joint Research Centre); Andersson N., Arena M., Auteri D., Barmaz S., Grignard E., Kienzler A., Lepper P., Lostia A. M., Munn S., Parra Morte J. M., Pellizzato F., Tarazona J., Terron A., Van der Linden S., 2018. Guidance for the identification of endocrine disruptors in the context of Regulations (EU) n°528/2012 and (EC) n°1107/2009. *Efsa Journal*, 16(6), 5311, 135 p. DOI : 10.2903/j.efsa.2018.5311
- Ecorys, 2018. Study supporting the REFIT Evaluation of the EU legislation on plant protection products and pesticides residues (Regulation (EC) n°1107/2009 and Regulation (EC) n°396/2005), Final report, 336 p. DOI : 10.2875/863905
- Edlinger A., Garland G., Hartman K., Banerjee S., Degrune F., García-Palacios P., Hallin S., Valzano-Held A., Herzog C., Jansa J., Kost E., Maestre T. F., Sánchez Pescador D., Philippot L., Rillig M. C., Romdhane S., Saghai A., Spor A., Frossard E., van der Heijden M. G. A., 2022. Agricultural management and pesticide use reduce the functioning of beneficial plant symbionts. *Nature, Ecology and Evolution*, 6, 1145-1154. DOI : 10.1038/s41559-022-01799-8
- EEA (European Environment Agency), 2022. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022, European Environment Agency, EEA/PUBL/2022/023, Brussels (Belgium), 961 p. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1>
- EEA, 2023. Briefing n°06/2023 — How pesticides impact human health and ecosystems in Europe. DOI : 10.2800/760240
- Efsa (European Food Safety Authority); Carrasco Cabrera L., Medina Pastor P., 2022. The 2020 European Union report on pesticide residues in food. *Efsa Journal*, 20(3), e07215, 57 p. DOI : 10.2903/j.efsa.2022.7215
- Ehler L. E., 2006. Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, 62(9), 787-789. DOI : 10.1002/ps.1247
- Ehlers B. K., Berg M. P., Staudt M., Holmstrup M., Glasius M., Ellers J., Tomiolo S., Madsen R. B., Slotsbo S., Penuelas J., 2020. Plant secondary compounds in soil and their role in belowground species interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(8), 716-730. DOI : 10.1016/j.tree.2020.04.001
- Eilenberg J., Hajek A., Lomer C., 2001. Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl* 46, 387-400. DOI : 10.1023/A:1014193329979
- Elhakeem A., Markovic D., Broberg A., Anten N. P., Ninkovic V., 2018. Aboveground mechanical stimuli affect belowground plant-plant communication. *PLoS One*, 13(5), e0195646. DOI : 10.1371/journal.pone.0195646
- Enjalbert J., Litrico I., Fournier E., Médiène S., Gauffreteau A., Borg J., Corre-Hellou G., Goldringer I., Hanachi M., Journet E.-P., Justes E., Morel J.-B., Naudin C., Sanguin H., Valentin-Morison M., Verret V., Bedoussac L., 2019. Mélanges variétaux et mélanges plurispécifiques — atouts et contraintes. *Innovations Agronomiques*, 75, 49-71. DOI : 10.15454/ak5jpd
- EP (European Parliament), Directorate-General for External Policies of the Union; Sarkar S., Dias J., Gil B., Keeley J., Möhring N., Jansen K., 2021. The use of pesticides in developing countries and their impact on health and the right to food, European Parliament. DOI : 10.2861/28995
- EPRS (European Parliamentary Research Service), 2016. Short food supply chains and local food systems in the EU, European Parliamentary Research Service, 10 p. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/586650/EPRS_BRI\(2016\)586650_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/586650/EPRS_BRI(2016)586650_EN.pdf)
- Erickson M. C., Doyle M. P., 2017. The Challenges of Eliminating or Substituting Antimicrobial Preservatives in Foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 371-390. DOI : 10.1146/annurev-food-030216-025952
- Escobar Rodríguez C., Antonielli L., Mitter B., Trognitz F., Sessitsch A., 2020. Heritability and Functional Importance of the *Setaria viridis* L. Bacterial Seed Microbiome. *Phytobiomes Journal*, 4(1), 40-52. DOI : 10.1094/PBIOMES-04-19-0023-R
- Estrada-Carmona N., Sánchez A. C., Remans R., Jones S. K., 2022. Complex agricultural landscapes host more biodiversity than simple ones: A global meta-analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, 38, e2203385119. DOI : 10.1073/pnas.2203385119
- EU SCAR (European Standing Committee on Agricultural Research), 2012. Agricultural Knowledge and Innovation Systems in Transition — a reflection paper, European Commission, Brussels (Belgium), 121 p. https://scar-europe.org/images/AKIS/Documents/AKIS_reflection_paper.pdf

- EU SCAR, 2019. Preparing for Future AKIS in Europe, European Commission, Brussels (Belgium), 375 p. https://scar-europe.org/images/AKIS/Documents/report-preparing-for-future-akis-in-europe_en.pdf
- Eurostat, 2021a. Farms and farmland in the European Union — statistics, Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Farms_and_farmland_in_the_European_Union_-_statistics
- Eurostat, 2021b. Farmers and the agricultural labour force — statistics, Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Farmers_and_the_agricultural_labour_force_-_statistics
- Eurostat, 2022. Agri-environmental indicator — specialization, Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_specialisation#cite_note-2
- Eurostat, 2023. Organic farming statistics. Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Developments_in_organic_farming
- Evans N., Baierl A., Semenov M. A., Gladders P., Fitt B. D. L., 2008. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(22), 525-531. DOI : 10.1098/rsif.2007.1136
- Ewert F., Baatz R., Finger R., 2023. Agroecology for a Sustainable Agriculture and Food System: From Local Solutions to Large-Scale Adoption. *Annual Review Resource Economics*, 15, 351-381. DOI : 10.1146/annurev-resource-102422-090105
- Fahrig L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487-515. <https://www.jstor.org/stable/30033784>
- Fahrig L., Girard J., Duro D., Pasher J., Smith A., Javorek S., King D., Lindsay K. F., Mitchell S., Tischendorf L., 2015. Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 219-234. DOI : 10.1016/j.agee.2014.11.018
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2008. Climate-related transboundary pests and diseases, Technical background document from the Expert consultation held on 25 to 27 February 2008, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 59 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9f31b468-7bfe-4fdf-8d2d-d61013176ef1/content>
- FAO, 2015. Climate change and food security: risks and responses. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 98 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a4fd8ac5-4582-4a66-91b0-55abf642a400/content>
- FAO, 2018a. NSP — Integrated Pest Management (IPM). <https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/ipm/en/>
- FAO, 2018b. The future of food and agriculture — Alternative pathways to 2050, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 224 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e51e0cf0-4ece-428c-8227-ff6c51b06b16/content>
- FAO, 2022a. Agrobiodiversité : Définition, in *Agrovoc*. <https://www.fao.org/agrovoc/fr/concepts-of-the-month/agrobiodiversite%3%A9>
- FAO, 2022b. The future of food and agriculture — Drivers and triggers for transformation, The Future of Food and Agriculture, n°3, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 444 p. DOI : 10.4060/cc0959en
- FAO, Fida, OMS, PAM, Unicef, 2017. L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2017. Renforcer la résilience pour favoriser la paix et la sécurité alimentaire, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italie), 144 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3d015c17-d026-4409-aeef-f1a4f4a6d2e1/content>
- FAOStat, 2020. Pesticide Use. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- Faure G., Desjeux Y., Gasselin P., 2012. New Challenges in Agricultural Advisory Services from a Research Perspective: A Literature Review, Synthesis and Research Agenda. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 18(5), 461-492. DOI : 10.1080/1389224X.2012.707063
- Favery B., Coustau C., 2021. Réponses des plantes aux attaques d'insectes et des nématodes, in Lannou C., Roby D., Ravigné V., Hannachi M., Moury B. (coord.), *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies.*, Versailles, éditions Quæ, 77-86.
- Feldmann C., Hamm U., 2015. Consumers' perceptions and preferences for local food: A review. *Food Quality and Preference*, 40(Part A), 152-164. DOI : 10.1016/j.foodqual.2014.09.014
- Feng H., Wang X., Duan Y., Zhang J., Zhang X., 2020. Applying blockchain technology to improve agri-food traceability: A review of development methods, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121031. DOI : 10.1016/j.jclepro.2020.121031

- Fielke S., Taylor B., Jaku E., 2020. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review. *Agricultural Systems*, 180, 102763. DOI : 10.1016/j.agry.2019.102763
- Finckh M. R., 2008. Integration of breeding and technology into diversification strategies for disease control in modern agriculture. *European Journal of Plant Pathology*, 121,399-409. DOI : 10.1007/s10658-008-9273-6
- Finckh M. R., Gacek E., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C., Munk L., Nadziak J., Newton A., Vallavielle-Pope (de) C., 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomy*, 20(7), 813-837. DOI : 10.1051/agro:2000177
- Finckh M. R., Wolfe M. S., 2006. Diversification strategies, in Cooke B., Jones D., Kaye B. (eds), *The Epidemiology of Plant Diseases*, Springer, Dordrecht, 269-307. DOI : 10.1007/1-4020-4581-6_10
- Flaherty S., McCarthy M., Collins A., McAuliffe F., 2017. Can existing mobile apps support healthier food purchasing behaviour? Content analysis of nutrition content, behaviour change theory and user quality integration. *Public Health Nutrition*, 21(2), 288-298. DOI : 10.1017/S1368980017002889
- Flinzberger L., Zingrebe Y., Bugalho M. N., Plieninger T., 2022. EU-wide mapping of 'Protected Designations of Origin' food products (PDOs) reveals correlations with social-ecological landscape values. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(43). DOI : 10.1007/s13593-022-00778-4
- Food Drink Europe, 2020. EU Food and Drink Industry: Data and Trends — 2020 Edition. <https://www.fooddrinkeurope.eu/wp-content/uploads/2021/02/FoodDrinkEurope-Data-Trends-2020-digital.pdf>
- FranceTerme, 2018. Bioagresseurs des cultures, in *Journal officiel*. <https://www.culture.fr/franceterme/terme/AGRI1320>
- Fritsch C., Appenzeller B., Burkart L., Coeurdassier M., Scheifler R., Raoul F., Driget V., Powolny T., Gagnaison C., Rieffel D., Alfonso E., Goydadin A.-C., Hardy E. M., Palazzi P., Schaeffer C., Gaba S., Bretagnolle V., Bertrand C., Pelosi C., 2022. Pervasive exposure of wild small mammals to legacy and currently used pesticide mixtures in arable landscapes. *Scientific Reports*, 12(1), 15904. DOI : 10.1038/s41598-022-19959-y
- 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. DOI : 10.1016/j.compag.2021.106233
- Fuzeau V., Dubois G., Therond O., Allaire G., 2012. Diversification des cultures dans l'agriculture française. État des lieux et dispositifs d'accompagnement, rapport technique. <https://hal.inrae.fr/hal-02810734>
- Gaitán-Cremaschi D., Klerx L., Duncan J., Trienekens J. H., Huenchuleo C., Dogliotti S., Contesse M. E., Rossing W. A. H., 2019. Characterizing diversity of food systems in view of sustainability transitions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1). DOI : 10.1007/s13593-018-0550-2
- Galli F., Prosperi P., Favilli E., D'Amico S., Bartolini F., Brunori G., 2020. How can policy processes remove barriers to sustainable food systems in Europe? Contributing to a policy framework for agri-food transitions. *Food Policy*, 96, 101871. DOI : 10.1016/j.foodpol.2020.101871
- Gandar A., Laffaille P., Marty-Gasset N., Viala D., Molette C., Jean S., 2017. Proteome response of fish under multiple stress exposure: effects of pesticide mixtures and temperature increase. *Aquatic Toxicology*, 184, 61-77. DOI : 10.1016/j.aquatox.2017.01.004
- Garibaldi L. A., Oddi F. J., Miguez F. E., Bartomeus I., Orr M. C., Jobbágy E. G., Kremen C., Schulte L. A., Hughes A. C., Bagnato C., Abramson G., Bridgewater P., Gomez Carella D., Díaz S., Dicks L. V., Ellis E. C., Goldenberg M., Huaylla C. A., Kuperman M., Locke H., Mehrabi Z., Santibañez F., Zhu C.-D., 2021. Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conservation Letters*, 14(2), e12773. DOI : 10.1111/cons.12773
- Garrett K. A., Alcalá-Briseño R. I., Andersen K. F., Choudhury R. A., Dantes W., Fayette J., Fulton J. C., Poudel R., Staub C. G., 2020. Adapting disease management systems under global change, in Ristaino J. B., Records A. (eds), *Emerging plant diseases and global food security*, St Paul (USA), APS Press, 1-13. DOI : 10.1094/9780890546383.003
- Gassmann A., Louda S. M., 2001. *Rhinocyllus conicus*: initial evaluation and subsequent ecological impacts in North America, in Wajnberg E., Scott J. K., Quimby P. C., *Evaluating indirect ecological effects of biological control*. Key papers from the symposium "Indirect ecological effects in biological control", Montpellier (France), October 17-20 1999, London (UK), CABI Publishing, 147-183. DOI : 10.1079/9780851994536.0147
- GBD (Global Burden of Disease) 2017 Diet Collaborators, 2019. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 393(10184), 1958-1972. DOI : 10.1016/S0140-6736(19)30041-8
- Ghini R., Hamada E., Pedro Júnior M. J., Gonçalves R. R. V., 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37(2), 85-93. DOI : 10.1590/S0100-54052011000200001

- Gijssels C., Bussels M., 2014. Farmers' cooperatives in Europe: social and historical determinants of cooperative membership in agriculture. *Annales de l'économie publique, sociale et coopérative*, 85(4), 509-530. DOI : 10.1111/apce.12049
- Giraud T., Gladieux P., Gavrillets S., 2010. Linking emergence of fungal plant diseases and ecological speciation. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(7), 387-395. DOI : 10.1016/j.tree.2010.03.006
- Goldringer I., Serpouy-Besson E., Rey F., Costanzo A., 2017. Varieties and population for on-farm participatory plant breeding, Diversifood Innovation Factsheet #2. https://diversifood.eu/wp-content/uploads/2018/06/Diversifood_innovation_factsheet2_VarietiesPopulations.pdf
- Goldringer I., van Frank G., Bouvier d'Yvoire C., Forst E., Galic N., Garnault M., Locqueville J., Pin S., Bailly J., Baltassat R., Berthelot J.-F., Caizergues F., Dalmasso C., Kochko (de) P., Gascuel J.-S., Hyacinthe A., Lacanette J., Mercier F., Montaz H., Ronot B., Rivière P., 2020. Agronomic evaluation of bread wheat varieties from participatory breeding: a combination of performance and robustness. *Sustainability*, 12(1), 128. DOI : 10.3390/su12010128
- Gopal M., Gupta A., 2016. Microbiome Selection Could Spur Next-Generation Plant Breeding Strategies. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1971. DOI : 10.3389/fmicb.2016.01971
- Goulet F., Vinck D., 2012. L'innovation par retrait. Contribution à une sociologie du détachement. *Revue française de sociologie*, 53(2), 195-224. DOI : 10.3917/rfs.532.0195
- Grettenberger I. M., Tooker J. F., 2015. Moving beyond resistance management toward an expanded role for seed mixtures in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 208, 29-36. DOI : 10.1016/j.agee.2015.04.019
- Grilli M. P., 2010. The role of landscape structure on the abundance of a disease vector planthopper: a quantitative approach. *Landscape Ecology*, 25(3), 383-394. DOI : 10.1007/s10980-009-9422-0
- Grimonprez B., 2022. Alternatives aux pesticides conventionnels : les voies de la normalisation. *Droit de l'environnement [La revue jaune]*, 309, 84. <https://hal.science/hal-03594916>
- Grimonprez B., Bouchemia I., 2020. Pesticides et riverains : l'impossible conciliation juridique? *La Semaine juridique — Édition générale*, 6, 296-302. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02491337/document>
- Grumbach S., Hamant O., 2020. How humans may co-exist with Earth? The case for suboptimal systems. *Anthropocene*, 30, 100245. DOI : 10.1016/j.ancene.2020.100245
- Grunert K. G., Hieke S., Wills J., 2014. Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. *Food Policy*, 44, 177-189. DOI : 10.1016/j.foodpol.2013.12.001
- Guiomar N., Godinho S., Pinto-Correia T., Almeida M., Bartolini F., Bezák P., Biró M., Bjørkhaug H., Bojnec Š., Brunori G., Corazzin M., Czekaj M., Davidova S., Kania J., Kristensen S., Marraccini E., Molnár Zs., Niedermayr J., O'Rourke E., Ortiz-Miranda D., Wästfelt A., 2018. Typology and distribution of small farms in Europe: Towards a better picture. *Land Use Policy*, 75, 784-798. DOI : 10.1016/j.landusepol.2018.04.012
- Gullino M. L., Pugliese M., Gilardi G., Garibaldi A., 2018. Effect of increased CO₂ and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *Journal of Plant Pathology*, 100, 371-389. DOI : 10.1007/s42161-018-0125-8
- Guyomard H., Bureau J.-C., Chatellier V., Détang-Dessendre C., Dupraz P., Jacquet F., Reboud X., Réquillart V., Soler L.-G., Tysebaert M., 2020. The Green Deal and the CAP: policy implications to adapt farming practices and to preserve the EU's natural resources, Research report (IP/B/AGRI/IC/2020-036) for European Parliament's Committee on Agriculture and Rural Development, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels (Belgium), 162 p.
- Haan N. L., Zhang Y., Landis D. A., 2020. Predicting Landscape Configuration Effects on Agricultural Pest Suppression. *Trends in Evolution and Ecology*, 35(2), 175-186. DOI : 10.1016/j.tree.2019.10.003
- Hacquard S., Spaepen S., Garrido-Oter R., Schulze-Lefert P., 2017. Interplay Between Innate Immunity and the Plant Microbiota. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 565-589. DOI : 10.1146/annurev-phyto-080516-035623
- Hakala K., Hannukkala A. O., Huusela-Veistola E., Jalli M., Peltonen-Sainio P., 2011. Pests and diseases in a changing climate: a major challenge for Finnish crop production. *Agricultural and Food Science*, 20(1), 3-14. DOI : 10.2137/145960611795163042
- Halliday F. W.; Rohr J. R., 2019. Measuring the shape of the biodiversity-disease relationship across systems reveals new findings and key gaps. *Nature Communications*, 10, 5032. DOI : 10.1038/s41467-019-13049-w
- Hallmann C. A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., Stenmans W., Müller A., Sumser H., Hören T., 2017. More than 75 Percent Decline over 27 Years in Total Flying Insect Biomass in Protected Areas. *PLoS One*, 12, e0185809. DOI : 10.1371/journal.pone.0185809

- Hamant O., Haswell E. S., 2017. Life behind the wall: Sensing mechanical cues in plants. *BMC Biology*, 15, 59. DOI : 10.1186/s12915-017-0403-5
- Hamel D., Rozman V., Liška A., 2020. Storage of Cereals in Warehouses with or without Pesticides. *Insects*, 11(12), 846. DOI : 10.3390/insects11120846
- Hammerschmidt R., Métraux J.-P., van Loon L. C., 2001. Inducing Resistance: A Summary of Papers Presented at the First International Symposium on Induced Resistance to Plant Diseases, Corfu, May 2000. *European Journal of Plant Pathology*, 107, 1-6. DOI : 10.1023/A:1008753630626
- Hansen H. O., 2020. Finance and corporate strategies in agriculture, Online Annexes of the 5th SCAR (Standing Committee of Agricultural Research) Foresight Exercise, Natural resources and food systems: Transitions towards a "safe and just" operating space, 159-183. https://scar-europe.org/images/FORESIGHT/ONLINE-ANNEXES_5th-SCAR-Foresight-Exercise_122020.pdf
- Happe K., Balmann A., Kellermann K., Sahrbacher C., 2008. Does structure matter? The impact of switching the agricultural policy regime on farm structures. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(2), 431-444. DOI : 10.1016/j.jebo.2006.10.009
- Hardelin J., Schwoob M.-H., 2021. Géographie économique des secteurs agricole et agroalimentaire français : quelques grandes tendances, document de travail n°15, Les publications du service de la statistique et de la prospective — Centre d'études et de prospective, 68 p. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/129400>
- Hartman K., van der Heijden M. G. A., Wittwer R. A., Banerjee S., Walsler J.-C., Schlaeppi K., 2018. Cropping practices manipulate abundance patterns of root and soil microbiome members paving the way to smart farming. *Microbiome*, 6, 14. DOI : 10.1186/s40168-017-0389-9
- Harvey J., Smith A., Goulding J., Branco Illodo I., 2020. Food sharing, redistribution, and waste reduction via mobile applications: A social network analysis. *Industrial Marketing Management*, 88, 437-448. DOI : 10.1016/j.indmarman.2019.02.019
- Hawtin G., Iwanaga M., Hodgkin T., 1996. Genetic resources in breeding for adaptation. *Euphytica*, 92(1-2), 255-266. DOI : 10.1007/BF00022853
- HBM4EU, 2022. Substance report — Pesticides, European Human Biomonitoring Initiative, 48 p. https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2022/07/Pesticides_Substance-report.pdf
- Hebinck A., Vervoort J. M., Hebinck P., Rutting L., Galli F., 2018. Imagining transformative futures: participatory foresight for food systems change. *Ecology & Society*, 23(2), 16. DOI : 10.5751/ES-10054-230216
- Heeb L., Jenner E., Cock M. J. W., 2019. Climate-smart pest management: building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92, 951-969. DOI : 10.1007/s10340-019-01083-y
- Heikkinen R. K., Luoto M., Virkkala R., Rainio K., 2004. Effects of habitat cover, landscape structure and spatial variables on the abundance of birds in an agricultural-forest mosaic. *Journal of Applied Ecology*, 41(5), 824-835. DOI : 10.1111/j.0021-8901.2004.00938.x
- Heil M., Adame-Álvarez R. M., 2010. Short signalling distances make plant communication a soliloquy. *Biology Letters*, 6(6), 843-845. DOI : 10.1098/rsbl.2010.0440
- Heil M., Karban R., 2010. Explaining evolution of plant communication by airborne signals. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(3), 137-144. DOI : 10.1016/j.tree.2009.09.010
- Helenius J., Hagolani-Albov S. E., Koppelmäki K., 2020. Co-creating Agroecological Symbioses (AES) for Sustainable Food System Networks. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 588715. DOI : 10.3389/fsufs.2020.588715
- Hendriksen N. B., 2022. Microbial biostimulants — the need for clarification in EU regulation. *Trends in Microbiology*, 30(4), 311-313. DOI : 10.1016/j.tim.2022.01.008
- Hermans F. L. P., Chaddad F. R., Gagalyuk T., Senesi S., Balmann A., 2017. The emergence and proliferation of agro-holdings and mega farms in a global context. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(2). DOI : 10.22434/IFAMR2016.0173
- Hervieu H., Purseigle F., 2009. Pour une sociologie des mondes agricoles dans la globalisation. *Études Rurales*, 183, 177-200. DOI : 10.4000/etudesrurales.8999
- Heyl K., Döring T., Garske B., Stubenrauch J., Ekardt F., 2020. The Common Agricultural Policy beyond 2020: A critical review in light of global environmental goals. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 30(1), 95-106. DOI : 10.1111/reel.12351
- Hill S. B., MacRae R. J., 1995. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1), 81-87. DOI : 10.1300/J064v07n01_07

- Hillen J., 2021. Online food prices during the COVID-19 pandemic. *Agribusiness*, 37(1), 91-107. DOI : 10.1002/agr.21673
- Hillocks R. J., 2012. Farming with fewer pesticides: EU pesticide review and resulting challenges for UK agriculture. *Crop Protection*, 31(1), 85-93. DOI : 10.1016/j.cropro.2011.08.008
- Hobbs J. E., 2020. Food supply chains during the COVID-19 pandemic. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 68(2), 171-176. DOI : 10.1111/cjag.12237
- Hoffmann A. A., Rymer P. D., Byrne M., Ruthrof K. X., Whinam J., McGeoch M., Bergstrom D. M., Guerin G. R., Sparrow B., Joseph L., Hill S. J., Andrew N. R., Camac J., Bell N., Riegler M., Gardner J. L., Williams S. E., 2019. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44(1), 3-27. DOI : 10.1111/aec.12674
- Holland J. M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103(1), 1-25. DOI : 10.1016/j.agee.2003.12.018
- Holland J. M., Bianchi F. J. J. A., Entling M. H., Moonen A.-C., Smith B. M., Jeanneret P., 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Management Science*, 72(9), 1638-51. DOI : 10.1002/ps.4318
- Holling C. S., 1973. Resilience and stability of ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23. <https://www.jstor.org/stable/2096802>
- Holling C. S., Gunderson L. H., Peterson G. D., 2002. Sustainability and Panarchies, in Gunderson L. H., Holling C. S. (eds), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington D.C. (USA), Island Press, 63-102.
- Hossard L., Guichard L., Pelosi C., Makowski D., 2017. Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. *Science of the Total Environment*, 575, 152-161. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2016.10.008
- Hossard L., Philibert A., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Munier-Jolain N., Jeuffroy M.-H., Richard G., Makowski D., 2014. Effects of halving pesticide use on wheat production. *Scientific Reports*, 4, 4405. DOI : 10.1038/srep04405
- Howard P. H., 2021. Concentration and Power in the Food System. Who Controls What We Eat? Revised Edition, London (UK), Bloomsbury Academic. DOI : 10.5040/9781474264365
- Howard P. H., Ajena F., Yamaoka M., Clarke A., 2021. "Protein" Industry Convergence and Its Implications for Resilient and Equitable Food Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 1-15. DOI : 10.3389/fsufs.2021.684181
- Huang C., Sun Z., Wang H., Luo Y., Ma Z., 2012. Effects of wheat cultivar mixtures on stripe rust: A meta-analysis on field trials. *Crop Protection*, 33, 52-58. DOI : 10.1016/j.cropro.2011.11.020
- Huan-Niemi E., Niemi J., Rikkonen P., Wuori O., Niemi J., 2017. Anticipating the Future of Finnish Agrifood Sector by Using Alternative Research Methods. *Journal of Food Products Marketing*, 23(5), 489-503. DOI : 10.1080/10454446.2014.1000443
- Huber M., Nieuwendijk N. M., Pantazopoulou C. K., Pierik R., 2021. Light signalling shapes plant-plant interactions in dense canopies. *Plant, Cell & Environment*, 44(4), 1014-1029. DOI : 10.1111/pce.13912
- Hunter P. J., Teakle G. R., 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. DOI : 10.3389/fpls.2014.00027
- IBMA (International Biocontrol Manufacturers Association), 2021. Biocontrol Market Size— IBMA Member Survey— Spring. <https://ibma-global.org/wp-content/uploads/2021/10/summary-of-2021-survey-data.pdf>
- IDF (International Diabetes Federation), 2021. *IDF Diabetes Atlas*, 10^e édition, Brussels (Belgium), IDF. <https://www.diabetesatlas.org>
- Igual J. F. J., Martí E. M., 2008. Social Economy and the Cooperative Movement in Europe: Contributions to a New Vision of Agriculture and Rural Development in the Europe of the 27. *CIRIEC, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 62, 147-172. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17412442006>
- Imamura F., Micha R., Khatibzadeh S., Fahimi S., Shi P., Powles J., Mozaffarian D., 2015. Dietary quality among men and women in 187 countries in 1990 and 2010: a systematic assessment. *The Lancet Global Health*, 3(3), e132-e142. DOI : 10.1016/s2214-109x(14)70381-x
- Ingram J., 2019. Agroecology — The role in food systems, food security and environment. European Conference on Crop Diversification (ECCD), Budapest. DOI : 10.5281/zenodo.3479021
- Insee, 2018. Dossier Nouvelle-Aquitaine n°7. La filière viti-vinicole : Bordeaux-Aquitaine et Charentes-Cognac, deux bassins proches et distincts. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3537221>

- IPES-Food, 2017. Too big to feed: Exploring the impacts of mega-mergers, consolidation and concentration of power in the agri-food sector, report 3, IPES-Food, Brussels (Belgium), 108 p. http://www.ipes-food.org/_img/upload/files/Concentration_FullReport.pdf
- IPES-Food, 2019. Towards a common food policy for the European Union. The policy reform an realignment that is required to build sustainable food systems in Europe, report, IPES-Food, Brussels (Belgium), 112 p. https://www.ipes-food.org/_img/upload/files/CFP_FullReport.pdf
- IPES-Food & ETC Group, 2021. A Long Food Movement: Transforming Food Systems by 2045, report, IPES-Food, Brussels (Belgium), 176 p. http://www.ipesfood.org/_img/upload/files/LongFoodMovementEN.pdf
- Isard S. A., Gage S. H., Comtois P., Russo J. M., 2005. Principles of the Atmospheric Pathway for Invasive Species Applied to Soybean Rust. *BioScience*, 55(10), 851-861. DOI : 10.1641/0006-3568(2005)055[0851:POTAPF]2.0.CO;2
- IVBD, 2021. Rapport d'activité 2020-2021. <https://www.calameo.com/read/0064014857e96c61b3ae1?page=1>
- Jabran K., Mahajan G., Sardana V., Chauhan B. S., 2015. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 72, 57-65. DOI : 10.1016/j.cropro.2015.03.004
- Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Litrico I., Malausa T., Reboud X., Huyghe C., 2022. Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 8. DOI : 10.1007/s13593-021-00742-8
- Jacquet F., Jouan J., 2022a. États des lieux de l'utilisation des pesticides, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, édition Quæ, 21-57. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Jacquet F., Jouan J., 2022b. Pourquoi faut-il changer de stratégie dans la protection des cultures ?, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 59-79. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B., 2019. Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103-108. DOI : 10.1016/j.cois.2019.07.010
- 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. DOI : 10.1093/ajae/aaw015
- Janjarasskul T., Suppakul P., 2018. Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 58(5), 808-831. DOI : 10.1080/10408398.2016.1225278
- Janssen M., Hamm U., 2012. Product labelling in the market for organic food: Consumer preferences and willingness-to-pay for different organic certification logos. *Food Quality and Preferences*, 25(1), 9-22. DOI : 10.1016/j.foodqual.2011.12.004
- Jardin (du) P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14. DOI : 10.1016/j.scienta.2015.09.021
- Jeanneaux P., 2018. Agriculture numérique : quelles conséquences sur l'autonomie de la décision des agriculteurs ? *Agronomie, Environnement & Sociétés* (Association Française d'Agronomie), Agronomie et agriculture numérique, 8(1), 13-22. <https://hal.uca.fr/hal-02065867/document>
- Jeanneaux P., Bodiguel L., Purseigle F., Hervieu B., 2020. Fragmentation du modèle de l'exploitation familiale et nouvelles structurations des relations capital-travail-foncier en agriculture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 10(2). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03134723/document>
- Jepsen M. R., Kuemmerle T., Müller D., Erb K., Verburg P. H., Haberl H., Vesterager J. P., Andrič M., Antrop M., Austrheim G., Björn I., Bondeau A., Bürgi M., Bryson J., Caspar G., Cassar L. F., Conrad E., Chromý P., Daugirdas V., Van Eetvelde V., Reenberg A., 2015. Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land Use Policy*, 49, 53-64. DOI : 10.1016/j.landusepol.2015.07.003
- Jeuffroy M.-H., Ballot R., Merot A., Meynard J.-M., Simon S., 2022. Des systèmes de culture agroécologiques pour diminuer l'usage des pesticides, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord.), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 81-116. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Johnson D., Gilbert L., 2015. Interplant signalling through hyphal networks. *New Phytologist*, 205(4), 1448-1453. DOI : 10.1111/nph.13115
- Jongman R. H. G., 2002. Homogenisation and fragmentation of the European landscape: ecological consequences and solutions. *Landscape and Urban Planning*, 58(2-4), 211-221. DOI : 10.1016/S0169-2046(01)00222-5

- Joose S., Hrcs B. J., 2015. Curating the quest for 'good food': The practices, spatial dynamics and influence of food-related curation in Sweden. *Geoforum*, 64, 205-216. DOI : 10.1016/j.geoforum.2015.06.024
- Jørgensen L. N., Hovmøller M. S., Hansen J. G., Lassen P., Clark B., Bayles R., Rodemann B., Flath K., Jahn M., Goral T., Czembor J. J., Cheyron P., Maumene C., De Pope C., Ban R., Nielsen G. C., Berg G., 2014. IPM Strategies and Their Dilemmas Including an Introduction to www.ewrowheat.org. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(2), 265-281. DOI : 10.1016/S2095-3119(13)60646-2
- Jouzel J.-N., 2019. *Pesticides, comment ignorer ce que l'on sait*, Paris, Presses de SciencePo, 272 p.
- Juroszek P., Racca P., Link S., Farhumand J., Kleinhenz B., 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 69(2), 179-193. DOI : 10.1111/ppa.13119
- Juroszek P., von Tiedemann A., 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60(1), 100-112. DOI : 10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x
- Juroszek P., von Tiedemann A., 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: a review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122(1), 3-15. <https://www.jstor.org/stable/24618923>
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.-P., Souchère V., Tournebize J., Réchauchère O., Savini I., Barbier M., Leiser H., 2013. *Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable*, Versailles, éditions Quæ, 112 p.
- Justes E., Richard G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. *Innovations Agronomiques*, 62, 1-15. DOI : 10.15454/1.5174017785695195E12
- Juul F., Hemmingsson E., 2015. Trends in consumption of ultra-processed foods and obesity in Sweden between 1960 and 2010. *Public Health Nutrition*, 18(Sup. 17), 3096-3107. DOI : 10.1017/S13688980015000506
- Kamilaris A., Fonts A., Prenafeta-Boldú F. X., 2019. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640-652. DOI : 10.1016/j.tifs.2019.07.034
- Karp D. S., Chaplin-Kramer R., Meehan T. D., et al., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 115(33), E7863-E7870. DOI : 10.1073/pnas.1800042115
- Kay S., Peuch J., Franco J., 2015. Extent of Farmland Grabbing in the EU, study, European Parliament, Directorate-general for internal policies, Policy Department: Structural and Cohesion Policies. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540369/IPOL_STU\(2015\)540369_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540369/IPOL_STU(2015)540369_EN.pdf)
- Keller S., Häni F., 2000. Ansprüche von Nützlingen und Schädlingen an den Lebensraum, in Nentwig W. (éd.), *Streifenförmige ökologische Ausgleichsflächen in der Kulturlandschaft: Ackerkrautstreifen, Buntbrache, Feldränder*. Verlag Agrarökologie, Bern (Allemagne), 199-217.
- Keller T., Or D., 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(21), e2117699119. DOI : 10.1073/pnas.2117699119
- Ketelsen M., Janssen M., Hamm U., 2020. Consumers' response to environmentally-friendly food packaging – A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120123. DOI : 10.1016/j.jclepro.2020.120123
- Khelifi M., Laguë C., Lacasse B., 2001. Pneumatic Control of Insects in Plant Protection, in Vincent C., Panetton B., Fleurat-Lessard F. (eds), *Physical Control Methods in Plant Protection*; Berlin, Heidelberg (Germany), Springer, 261-269. DOI : 10.1007/978-3-662-04584-8_18
- Kinzig A. P., Ryan P., Etienne M., Allison H., Elmqvist T., Walker B. H., 2006. Resilience and Regime Shifts: Assessing Cascading Effects. *Ecology and Society*, 11(1), 20. DOI : 10.5751/ES-01678-110120
- Kirsch A., 2017. Politique agricole commune, aides directes à l'agriculture et environnement : analyse en France, en Allemagne et au Royaume-Uni, Thèse Université Bourgogne Franche-Comté (France), Sciences économiques. <https://theses.hal.science/tel-01712419>
- Klassen W., Curtis C. F., 2005. History of the Sterile Insect Technique, in Dyck V. A., Hendrichs J., Robinson A. S. (eds), *Sterile Insect Technique. Principles and Practices in Area-Wide Integrate Pest Management*. Dordrecht (P-B), Springer, 3-36. DOI : 10.1007/1-4020-4051-2_1
- Klerkx L., Jakku E., Labarthe P., 2019. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS — Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91(1), 1-16. DOI : 10.1016/j.njas.2019.100315

- Klerkx L., Rose D., 2020. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, 100347. DOI : 10.1016/j.gfs.2019.100347
- Knierim A., Boenning K., Caggiano M., Cristóvão A., Dirimanova V., Koehnen T., Labarthe P., Prager K., 2015. The AKIS Concept and its Relevance in Selected EU Member States. *Outlook on Agriculture*, 44(1), 29-36. DOI : 10.5367/oa.2015.0194
- 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. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2017.07.018
- Koch M. A., Tosun J., Kellermann L., Marek C., Kiefer M., Thiv M., 2023. Reducing pesticides without organic certification? Potentials and limits of an intermediate form of agricultural production. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2202892. DOI : 10.1080/23311932.2023.2202892
- Koch R. L., Galvan T. L., 2008. Bad side of a good beetle: the North American experience with *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53, 23-35. DOI : 10.1007/s10526-007-9121-1
- Kok K., van Vliet M., Bärhund L., Dubel A., Sendzimir J., 2011. Combining participative backcasting and exploratory scenario development: Experiences from the SCENES project. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(5), 835-851. DOI : 10.1016/j.techfore.2011.01.004
- Kong C.-H., Zhang S.-Z., Li Y.-H., Xia Z.-C., Yang X.-F., Meiners S. J., Wang P., 2018. Plant neighbor detection and allelochemical response are driven by root-secreted signaling chemicals. *Nature Communications*, 9, 3867, 1-9. DOI : 10.1038/s41467-018-06429-1
- Koo T.-H., Hong S.-J., Yun S.-C., 2016. Changes in the Aggressiveness and Fecundity of Hot Pepper Anthracnose Pathogen (*Colletotrichum acutatum*) under Elevated CO₂ and Temperature over 100 Infection Cycles. *The Plant Pathology Journal*, 32(3), 260-265. DOI : 10.5423/PPJ.NT.09.2015.0183
- Koppelmäki K., Eerola M., Albov S., Kivelä J., Helenius J., Winquist E., Virkkunen E., 2016. "Palopuro Agroecological Symbiosis": A Pilot Case Study on Local Sustainable Food and Farming (Finland), in Rytkönen P., Hård U., Challenges for the New Rurality in a Changing World: Proceedings from the 7th International Conference on Localized Agri-Food Systems, May 8-10, COMREC Studies in Environment and Development 12, Huddinge (Sweden), 171-172. <https://collaboratif.cirad.fr/alfresco/s/d/workspace/SpacesStore/16d1b66d-833d-4818-9ae5-12e865bb730d/220255.pdf>
- Koricheva J., Hayes D., 2018. The relative importance of plant intraspecific diversity in structuring arthropod communities: A meta-analysis. *Functional Ecology*, 32(7), 1704-1717. DOI : 10.1111/1365-2435.13062
- Koulytchizky S., Mauget R., 2014. Le développement des groupes coopératifs agricoles depuis un demi-siècle. À la recherche d'un nouveau paradigme, colloque de l'Ades : Les groupes d'économie sociale : concurrence et concentration. *Revue internationale de l'économie sociale*, 287, 14-40. DOI : 10.7202/1022208ar
- Kuhfuss L., Subervie J., 2018. Do European Agri-environment Measures Help Reduce Herbicide Use? Evidence From Viticulture in France. *Ecological Economics*, 149, 202-211. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2018.03.015
- Kujala S., Hakala O., Viitaharju L., 2022. Factors affecting the regional distribution of organic farming. *Journal of Rural Studies*, 92, 226-236. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2022.04.001
- Kuns B., Visser O., Wästfelt A., 2016. The stock market and the steppe: the challenges faced by stockmarket financed, Nordic farming ventures in Russia and Ukraine. *Journal of Rural Studies*, 45, 199-217. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2016.03.009
- Labarthe P., 2016. Transformations du conseil aux agriculteurs et innovations agronomiques, perspectives et débats européens. *Agronomie, Environnement & Sociétés* (Association Française d'Agronomie), 24(2), 177-184. <https://hal.science/hal-01608695/>
- Labreuche J., Métails P., Vuillemin F., Bonin L., Colbach N., 2020. Le faux semis : identifier les clés du succès. *Innovations Agronomiques*, 81, 51-67. DOI : 10.15454/e8zr-w568
- Lachaise T., Ourry M., Lebreton L., Guillerme-Erckelboudt A.-Y., Linglin J., Paty C., Chaminade V., Marnet N., Aubert J., Poinot D., Cortesero A.-M., Mougél C., 2017. Can soil microbial diversity influence plant metabolites and life history traits of a rhizophagous insect? A demonstration in oilseed rape. *Insect Science*, 24(6), 1045-1056. DOI : 10.1111/1744-7917.12478
- Laetz C. A., Baldwin D. H., Collier T. K., Hebert V., Stark J. D., Scholz N. L., 2009. The synergistic toxicity of pesticide mixtures: implications for risk assessment and the conservation of endangered Pacific salmon. *Environmental Health Perspectives*, 117(3), 348-353. DOI : 10.1289/ehp.0800096

- Laget E., Guadagnini M., Plénet D., Simon S., Assié G., Billote B., Borioli P., Bourgouin B., Fratantuono M., Guérin A., Hucbourg B., Lemarquand A., Loquet B., Mercadal M., Parveaud C. E., Ramade L., Rames M.-H., Ricaud V., Rousselou C., Sagnes J.-L., Zavagli F., 2015. Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques. GIS Fruits et Ministère de l'agriculture, Paris, 264 p.
- Lamine C., Garçon L., Brunori G., 2019. Territorial agrifood systems: A Franco-Italian contribution to the debates over alternative food networks in rural areas. *Journal of Rural Studies*, 68, 159-170. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2018.11.007
- Lamine C., Meynard J.-M., Bui S., Messéan 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*, 8, 121-134. <https://hal.inrae.fr/hal-02667368>
- Lammers van Bueren E. T., Struik P. E., Jakobsen E., 2002. Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype. *NJAS (Netherlands Journal of Agricultural Science) – Wageningen Journal of Life Sciences*, 50(1), 1-26. DOI : 10.1016/S1573-5214(02)80001-X
- Lance D. R., Leonard D. S., Mastro V. C., Walters M. L., 2016. Mating Disruption as a Suppression Tactic in Programs Targeting Regulated Lepidopteran Pests in US. *Journal of Chemical Ecology*, 42, 590-605. DOI : 10.1007/s10886-016-0732-9
- Laperche A., Jubault M., Manzanares-Dauleux M., Carof M., Le Cadre E., 2022. Développer des espèces et des variétés permettant la reconception des systèmes de culture, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord.), *Zéro pesticide, Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 149-175. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Laurent C. E., Baldi I., Bernadac G., Berthet A., Colosio C., et al., 2016. Expositions professionnelles aux pesticides en agriculture, rapport d'expertise collective, autosaisine 2011-SA-0192, Anses, Maison-Alfort, 215 p.
- Launay M., Caubel J., Bourgeois G., Huard F., Cortazar-Atauri (de) I. G., Bancal M.-O., Brisson N., 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197, 147-158. DOI : 10.1016/j.agee.2014.07.020
- Latour B., 2005. *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network Theory*. Oxford University Press Inc., New-York (USA). https://pedropeixotoferreira.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/01/latour_2005_reassembling-the-social-an-introduction-to-actor-network-theory_book.pdf
- Latour B., 2014. *Changer de société, refaire de la sociologie*, Paris, éditions La Découverte, 406 p.
- Lavocat L., 2021. À Vittef, Nestlé contrôle l'eau, la politique et les esprits. Reportage — Eau et rivières. *Reporterre*. <https://reporterre.net/A-Vittef-Nestle-controle-l-eau-la-politique-et-les-esprits>
- Leclair L., 2022. De la ferme familiale à la firme internationale. L'agro-industrie avale la terre. *Le Monde Diplomatique*, 9395. <https://www.monde-diplomatique.fr/2022/02/LECLAIR/64330>
- Lecole P., Moraine M., 2021. La PAC au service des collectifs agricoles : enseignements de projets agroécologiques innovants. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 11(1), 1-14. <https://hal.inrae.fr/hal-03340632/document>
- Lee J., Gereffi G., Beauvais J., 2012. Global value chains and agrifood standards: Challenges and possibilities for smallholders in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 109(31), 12326-12331. DOI : 10.1073/pnas.0913714108
- Leenhardt S., Mamy L., Pesce S., Sanchez W. (coord.), 2023. *Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques*, Versailles, éditions Quæ, 184 p. DOI : 10.35690/978-2-7592-3657-2
- Le Mouél C., De Lattre-Gasquet M., Mora O. (eds.), 2018. *Land Use and Food Security in 2050: a Narrow Road*, Versailles, éditions Quæ. DOI : 10.35690/978-2-7592-2880-5
- Lenain R., Peyrache J., Savary A., Séverac G., 2021. *Agricultural robotics: part of the new deal? FIRA 2020 conclusions: With 27 agricultural robot information sheets*, Versailles, éditions Quæ, 80 p. DOI : 10.35690/978-2-7592-3382-3
- Lennon R. J., Shore R. F., Pereira M. G., Peach W. J., Dunn J. C., Arnold K. E., Brown C. D., 2020. From seeds to plasma: confirmed exposure of multiple farmland bird species to clothianidin during sowing of winter cereals. *Science of The Total Environment*, 723, 138056. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2020.138056
- Letourneau D. K., Armbrecht I., Rivera B. S., Lerma J. M., Carmona E. J., Daza M. C., Escobar S., Galindo V., Gutiérrez C., López S. D., Mejía J. L., Rangel A. M. A., Rangel J. H., Rivera L., Saavedra C. A., Torres A. M., Trujillo A. R., 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications*, 21(1), 9-21. DOI : 10.1890/09-2026.1

- Li Z.-G., Gong M., 2011. Mechanical Stimulation-Induced Cross-Adaptation in Plants: An Overview. *Journal of Plant Biology*, 54, 358-364. DOI : 10.1007/s12374-011-9178-3
- Lichtenberg E. M., Kennedy C. M., Kremen C., *et al.*, 2017. A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 23(11), 4946- 4957. DOI : 10.1111/gcb.13714
- Lipper L., Thornton P., Campbell B. M., Baedeker T., Braimoh A., Bwalya M., Caron P., Cattaneo A., Garrity D., Henry K., Hottle R., Jackson L., Jarvis A., Kossam F., Mann W., McCarthy N., Meybeck A., Neufeldt H., Remington T., Sen P. T., Sessa R., Shula R., Tibu A., Torquebiau E. F., 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4, 1068-1072. DOI : 10.1038/nclimate2437
- Litrice I., Violle C., 2015. Diversity in Plant Breeding: A New Conceptual Framework. *Trends in Plant Science*, 20(10), 604-613. DOI : 10.1016/j.tplants.2015.07.007
- Louda S. M., Pemberton R. W., Johnson M. T., Follett P. A., 2003. Non-Target Effects: The Achilles' Heel of Biological Control? Retrospective Analyses to Reduce Risk Associated with Biocontrol Introductions. *Annual Review of Entomology*, 48, 365-396. DOI : 10.1146/annurev.ento.48.060402.102800
- Lucas P., *et al.*, 2019. Pherosensor : Détection précoce des insectes ravageurs à l'aide de capteurs olfactifs utilisant des récepteurs phéromonaux, projet du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement », 2021-2027, 45 p.
- Lucas V., Gasselini P., Thomas F., Vaquié P.-F., 2014. Coopération agricole de production : quand l'activité agricole se distribue entre exploitation et action collective de proximité, in Gasselini P., Choisis J.-P., Petit S., Purseigle F., *L'agriculture en famille : travailler, réinventer, transmettre*, Les Ulis : EDP Sciences, 201-222. DOI : 10.1051/978-2-7598-1765-8.c012
- Lucas V., Gasselini P., 2016. Farm machinery cooperatives: a new arena for agroecological innovation? International Symposium on Work in Agriculture, Nov. 2016, Maringá (France), 10 p. <https://hal.science/hal-01860865/document>
- Luck J., Spackman M., Freeman A., Trębicki P., Griffiths W., Finlay K., Chakraborty S., 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60(1), 113-121. DOI : 10.1111/j.1365-3059.2010.02414.x
- Lupatini M., Korthals G. W., Hollander (de) M., Janssens T. K. S., Kuramae E. E., 2017. Soil microbiome is more heterogeneous in organic than in conventional farming system. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1-13. DOI : 10.3389/fmicb.2016.02064
- Maaf (Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt), 2015. L'Organisation Nationale de la Protection des Végétaux. Plaqueette de présentation. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/71722>
- Masa (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire), 2016a. Bulletins de Santé du Végétal. <https://agriculture.gouv.fr/bulletins-de-sante-du-vegetal>
- Masa, 2016b. Le BSV, pour quoi? Pour qui? <https://agriculture.gouv.fr/le-bsv-pour-quoi-pour-qui>
- Masa, 2022. Qu'est-ce que le biocontrôle? <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrole>
- Machwitz M., Pieruschka R., Berger K., Schlerf M., Aasen H., Fahrner S., Jiménez-Berni J., Baret F., Rascher U., 2021. Bridging the Gap Between Remote Sensing and Plant Phenotyping — Challenges and Opportunities for the Next Generation of Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 12, 749374. DOI : 10.3389/fpls.2021.749374
- Malausa T., Parmentier-Cajaiba A., Brisset M.-N., Boutet M., 2022. Le(s) biocontrôle(s) dans une perspective d'agriculture sans pesticides, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord.), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 117-148. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 43-62. DOI : 10.1051/agro:2007057
- Malmstrom C. M., Melcher U., Bosque-Pérez N. A., 2011. The expanding field of plant virus ecology: Historical foundations, knowledge gaps, and research directions. *Virus Research*, 159(2), 84-94. DOI : 10.1016/j.virusres.2011.05.010
- Marchand P. A., 2022. Evolution of plant protection active substances in Europe: the disappearance of chemicals in favour of biocontrol agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 1-17. DOI : 10.1007/s11356-022-24057-7

- Mari M., Bautista-Baños S., Sivakumar D., 2016. Decay control in the postharvest system: Role of microbial and plant volatile organic compounds. *Postharvest Biology and Technology*, 122, 70-81. DOI : 10.1016/j.postharvbio.2016.04.014
- Markovic D., Colzi I., Taiti C., Ray S., Scalone R., Gregory Ali J., Mancuso S., Ninkovic V., 2019. Airborne signals synchronize the defenses of neighboring plants in response to touch. *Journal of Experimental Botany*, 70(2), 691-700. DOI : 10.1093/jxb/ery375
- Markovic D., Nikolic N., Glinwood R., Seisenbaeva G., Ninkovic V., 2016. Plant Responses to Brief Touching: A Mechanism for Early Neighbour Detection? *PLoS One*, 11, e0165742. DOI : 10.1371/journal.pone.0165742
- Martin E. A., Dainese M., Clough Y., et al., 2019. The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology letters*, 22(7), 1083-1094. DOI : 10.1111/ele.13265
- Martinetti D., Soubeyrand S., 2019. Identifying Lookouts for Epidemio-Surveillance: Application to the Emergence of *Xylella fastidiosa* in France. *Phytopathology*, 109(2), 265-276. DOI : 10.1094/PHYTO-07-18-0237-FI
- Maruyama S., Streletskaia N. A., Lim J., 2021. Clean label: Why this ingredient but not that one? *Food Quality and Preference*, 87, 104062. DOI : 10.1016/j.foodqual.2020.104062
- Massa G. D., Gilroy S., 2003. Touch modulates gravity sensing to regulate the growth of primary roots of *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 33(3), 435-445. DOI : 10.1046/j.1365-313x.2003.01637.x
- Maurya A., Prasad J., Das S., Dwivedy A. K., 2021. Essential Oils and Their Application in Food Safety. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. DOI : 10.3389/fsufs.2021.653420
- Mayer A., Muller A., Kalt G., Roux N., Weisshaidinger R., Röss E., Kaufmann L., Matej S., Theurl M. C., Ferguson S., Hart R., Smith P., Erb K.-H., 2021. Deliverable D4.3 of the UNISECO Horizon 2020 project: Report on Territorial Impacts and Lessons Learnt of the Diffusion of Agro-ecological Farming Systems (AEFS) in the European Union, 124 p. DOI : 10.5281/zenodo.5576259
- McDaniel M. D., Tiemann L. K., Grandy A. S., 2014. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications*, 24(3), 560-570. DOI : 10.1890/13-0616.1
- McPhee C., Banczer M., Mambrini-Doudet M., Chrétien F., Huyghe C., Gracia-Garza J., 2021. The Defining Characteristics of Agroecosystem Living Labs. *Sustainability*, 13(4), 1718. DOI : 10.3390/su13041718
- Medawar E., Huhn S., Villringer A., Witte A. V., 2019. The effects of plant-based diets on the body and the brain: a systematic review. *Translational Psychiatry*, 9, 226. DOI : 10.1038/s41398-019-0552-0
- Médiène S., Valantin-Morison M., Sarthou J.-P., Tourdonnet (de) S., Gosme M., Bertrand M., Estrade J. R., Aubertot J.-N., Rusch A., Motisi N., Pelosi C., Doré T., 2011. Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 491-514. DOI : 10.1007/s13593-011-0009-1
- Mendes M., Kruijt M., Bruijn (de) I., Dekkers E., van der Voort M., Schneider J. H. M., Piceno Y. M., DeSantis T. Z., Andersen G. L., Bakker P. A. H. M., Raaijmakers J. M., 2011. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science*, 322(6033), 1097-100. DOI : 10.1126/science.1203980
- Meneses Y., Cannon K. J., Flores R. A., 2014. Keys to understanding and addressing consumer perceptions and concerns about processed foods, Faculty Publications: Agricultural Leadership, Education & Communication Department, 83, 141-146. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=aglecfacpub>
- Mertens E., Kuijsten A., Dořková M., Mistura L., D'Addezio L., Turrini A., Dubuisson C., Favret S., Havad S., Trolle E., Van't Veer P., Geleijnse J. M., 2019. Geographic and socioeconomic diversity of food and nutrient intakes: a comparison of four European countries. *European journal of nutrition*, 58(4), 1475-1493. DOI : 10.1007/s00394-018-1673-6
- Mertens E., Colizzi C., Peñalvo J. L., 2022. Ultra-processed food consumption in adults across Europe. *European Journal of Nutrition*, 61, 1521-1539. DOI : 10.1007/s00394-021-02733-7
- Metay A., Garcia L., Gary C., 2018. Gestion durable de la flore adventice en culture pérenne : enjeu et stratégies en viticulture, in Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 245-255.
- Méthot P.-O., Alizon S., 2014. What is a pathogen? Toward a process view of host-parasite interactions. *Virulence*, 5(8), 775-785. DOI : 10.4161/21505594.2014.960726
- Meuwissen M. P. M., Feindt P. H., Spiegel A., Termeer C. J. A. M., Mathijs E., Mey (de) Y., Finger R., Balmann A., Wauters E., Urquhart J., Viganò M., Zawalińska K., Herrera H., Nicholas-Davies P., Hansson H., Paas W., Slijper T., Coopmans I., Vroege W., Ciecchomska A., Reidsma P., 2019. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems*, 176, 102656. DOI : 10.1016/j.agsy.2019.102656

- 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, 1-13. DOI : 10.1007/s13593-018-0535-1
- Meynard J.-M., Girardin P., 1991. Produire autrement. *Courrier de la cellule environnement Inra*, 15(15), 1-19. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01207904>
- Meynard J.-M., Messéan A. (coord.), 2014. *La diversification des cultures. Lever les obstacles agronomiques et économiques*, Versailles, éditions Quæ, 106 p.
- Miedaner T., Juroszek P., 2021a. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1771-1785. DOI : 10.1007/s00122-021-03807-0
- Miedaner T., Juroszek P., 2021b. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology*, 70(5), 1032-1046. DOI : 10.1111/ppa.13365
- Mikkelsen B. L., Jørgensen R. B., Lyngkjær M. F., 2014. Complex interplay of future climate levels of CO₂, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. *Plant Pathology*, 64(2), 319-327. DOI : 10.1111/ppa.12272
- Miles I., Saritas O., Solokov A., 2016. *Foresight for Science, Technology and Innovation*, Cham (Switzerland), Springer International Publishing, 270 p. DOI : 10.1007/978-3-319-32574-3
- Miller R., 2018. Sensing and making-sense of Futures Literacy. Towards a Futures Literacy Framework (FLF), in Miller R. (ed.), *Transforming the Future. Anticipation in the 21st Century*, Londres (R-U), Routledge, 15-50. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9781351048002-2/sensing-making-sense-futures-literacy-riel-miller>
- Ministry of Agriculture and Forestry in Finland, 2021. Organic 2.0 — Finland's National Programme for Organic Production 2030, Publications of the Ministry of Agriculture and Forestry, 2023-9, Helsinki, 32 p. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164748/MMM_2023_9.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mitchell M. G. E., Bennett E. M., Gonzalez A., 2013. Linking Landscape Connectivity and Ecosystem Service Provision: Current Knowledge and Research Gaps. *Ecosystems*, 16, 894-908. DOI : 10.1007/s10021-013-9647-2
- Mitter H., Techen A.-K., Sinabell F., Helming K., Kok K., Priess J. A., Schmid E., Bodirsky B. L., Holman I., Lehtonen H., Leip A., Le Mouél C., Mathijs E., Mehdi B., Michetti M., Mittenzwei K., Mora O., Øygarden L., Reidsma P., Schönhart M., 2019. A protocol to develop Shared Socio-economic Pathways for European agriculture. *Journal of Environmental Management*, 252, 109701. DOI : 10.1016/j.jenvman.2019.109701
- Mocali S., Paffetti D., Emiliani G., Benedetti A., Fani R., 2008. Diversity of heterotrophic aerobic cultivable microbial communities of soils treated with fumigants and dynamics of metabolic, microbial, and mineralization quotients. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 557-569. DOI : 10.1007/s00374-007-0235-5
- Möhring N., Finger R., 2022. Pesticide-free but not organic: Adoption of a large-scale wheat production standard in Switzerland. *Food Policy*, 106, 102188. DOI : 10.1016/j.foodpol.2021.102188
- Möhring N., Ingold K., Kudsk P., Martin-Laurent F., Niggli U., Siegrist M., Studer B., Walter A., Finger R., 2020. Pathways for advancing pesticide policies. *Nature Food*, 1, 535-540. DOI : 10.1038/s43016-020-00141-4
- Moller B., Voglhuber-Slavinsky A., Dönitz E., Rosa A., 2019. 50 trends influencing Europe's food sector by 2035 — The FOX project, Fraunhofer Institute for Systems and Innovations Research ISI, Karlsruhe (Germany), 44 p. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccv/2019/50-trends-influencing-Europes-food-sector.pdf>
- Mombert P., Gujjarro Díaz-Otero B., Alonso-Prados J. L., 2022. Study of the different evaluation areas in the pesticide risk assessment process. *EFSA Journal*, 20(S1), e200412. DOI : 10.2903/j.efsa.2022.e200412
- Montagné N., Gévar J., Lucas P., 2020. Médiateurs chimiques et communication chez les insectes, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C., *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 199-207.
- Monteiro C. A., Cannon G., Levy R. B., Moubarac J.-C., Louzada M. L. C., Rauber F., Khandpur N., Cediel G., Neri D., Martinez-Steele E., Baraldi L. G., Jaime P. C., 2019. Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. *Public Health Nutrition*, 22(5), 936-941. DOI : 10.1017/s1368980018003762
- Mora O., Banos V., Regolini M., Carnus J.-M., 2013. Using scenarios for forest adaptation to climate change: a foresight study of the Landes de Gascogne forest 2050. *Annals of Forest Science*, 71, 313-324. DOI : 10.1007/s13595-013-0336-2

- Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouël C., Meunier C., Forslund A., Kieffer V., Paresys L., 2023. European Chemical Pesticide-Free Agriculture in 2050, Foresight report, INRAE (France), 646 p. DOI : 10.17180/ca9n-2p17
- Mora O., 2018. Dietary Changes, Nutrition Transition and the Future of Global Diets, in Le Mouël C., Lattre-Gasquet D., Mora O. (coord.), *Land use and food security in 2050: a narrow road*, Versailles, éditions Quæ, 112-137.
- Mora O., Le Mouël C., Lattre-Gasquet (de) M., Donnars C., Dumas P., Rechauchère O., Brunelle T., Manceron S., Marajo-Petizon E., Moreau C., Barzman M., Forslund A., Marty P., 2020. Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLoS One*, 15(7), e0235597. DOI : 10.1371/journal.pone.0235597
- 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. DOI : 10.1016/j.agsy.2016.06.002
- Morison M., David C., Cadoux S., Lorin M., Celette F., Amosse C., Basset A., 2014. Association d'une culture de rente et espèces compagnes permettant la fourniture de services écosystémiques. *Innovations Agronomiques*, 40, 93-112. DOI : 10.17180/r3t2-d893
- Morris C. E., Bardin M., Kinkel L. L., Moury B., Nicot P. C., Sands D. C., 2009. Expanding the paradigms of plant pathogen life history and evolution of parasitic fitness beyond agricultural boundaries. *PLoS Pathogens*, 5(12), e1000693. DOI : 10.1371/journal.ppat.1000693
- 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*, 71(1), 86-97. DOI : 10.1111/ppa.13446
- Mosquera-Losada M. R., McAdam J. H., Romero-Franco R., Santiago-Freijanes J. J., Rigueiro-Rodríguez A., 2009. Definitions and Components of Agroforestry Practices in Europe, in Rigueiro-Rodríguez A., McAdam J., Mosquera-Losada M. R. (eds), *Agroforestry in Europe. Advances in Agroforestry*, vol. 6, Springer, Dordrecht (P-B). DOI : 10.1007/978-1-4020-8272-6_1
- Mougel C., et al., 2019. Deep impact: Deciphering plant-microbiota interactions to enhance crop defenses to pests, projet du programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement », 2021-2027, 61 p.
- Munier-Jolain N., 2018. Leviers de la protection intégrée en grandes cultures : principes, modes d'action, efficacité, in Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 111-132.
- Munier-Jolain N., Mediene S., Meiss H., Boissinot F., Rainer W., Jacques C., Bretagnolle V., 2012. Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innovations Agronomiques*, 22, 71-84. DOI : 10.17180/jb3s-vy34
- Murcia-Morales M., Díaz-Galiano F. J., Vejsnæs F., Kilpinen O., Van der Steen J. J. M., Fernández-Alba A. R., 2021. Environmental monitoring study of pesticide contamination in Denmark through honey bee colonies using APIStrip-based sampling. *Environmental Pollution*, 290, 117888. DOI : 10.1016/j.envpol.2021.117888
- Muresan I. C., Harun R., Arion F. H., Brata A. M., Chereches I. A., Chiciudean G. O., Dumitras D. E., Oroian C. F., Tirpe O. P., 2021. Consumers' Attitude towards Sustainable Food Consumption during the COVID-19 Pandemic in Romania. *Agriculture*, 11(11), 1050. DOI : 10.3390/agriculture11111050
- Naranjo N. E., 2001. Conservation and evaluation of natural enemies in IPM systems for *Bemisia tabaci*. *Crop Protection*, 20(9), 835-852. DOI : 10.1016/S0261-2194(01)00115-6
- Neuenfeldt S., Gocht A., Heckelei T., Ciaian P., 2019. Explaining farm structural change in the European agriculture: a novel analytical framework. *European Review of Agricultural Economics*, 46(5), 713-768. DOI : 10.1093/erae/jby037
- Nguyen G., Lepage F., Purseigle F., 2017. L'entrée de capitaux externes dans les exploitations agricoles. Une facette méconnue des agricultures de ferme en France, in Purseigle F., Nguyen G., Blanc P. (dir.), *Le nouveau capitalisme agricole. De la ferme à la firme*, Paris, Presses de SciencesPo, 65-95. DOI : 10.3917/scpo.purse.2017.01.0065
- Nguyen G., Purseigle F., 2012. Les exploitations agricoles à l'épreuve de la firme. L'exemple de la Camargue. *Études rurales*, 190, 99-118. DOI : 10.4000/etudesrurales.9695
- Nguyen G., Purseigle F., Brailly J., Legagneux B., 2020. Sous-traitance et délégation du travail : marqueurs des mutations de l'organisation de la production agricole. *Notes et études socio-économiques*, 47, 43-88. https://ressources.terredeliens.org/les-ressources?task=download&collection=u_util_jquery_docs_upload&xi=0&file=u_util_jquery_docs_upload&id=886
- Nguyen Van Long N., Joly C., Dantigny P., 2016. Active packaging with antifungal activities. *International Journal of Food Microbiology*, 220, 73-90. DOI : 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.01.001

- Nichols V., Verhulst N., Cox R., Govaerts B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research*, 183, 56-68. DOI : 10.1016/j.fcr.2015.07.012
- Ninkovic V., Dahlin I., Vucetic A., Petrovic-Obradovic O., Glinwood R., Webster B., 2013. Volatile Exchange between Undamaged Plants — a New Mechanism Affecting Insect Orientation in Intercropping. *PLoS One*, 8(7), e69431. DOI : 10.1371/journal.pone.0069431
- Oerke E. C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43. DOI : 10.1017/S0021859605005708
- Ollat N., Touzard J.-M., van Leeuwen C., 2016. Climate Change Impacts and Adaptations: New Challenges for the Wine Industry. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 139-149. DOI : 10.1017/jwe.2016.3
- Oliva C., Mouton L., Colinet H., Debelle A., Gibert P., Fellous S., 2020. Principes, mise en œuvre et perspective de la technique de l'insecte stérile, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 75-90.
- Open Food Facts, 2022. Open Data [WWW Document]. <https://world.openfoodfacts.org/who-we-are>
- Oqali, 2019. Bilan et évolution de l'utilisation des additifs dans les produits transformés — Oqali — Édition 2019. https://www.oqali.fr/media/2021/12/OQALI_2019_Rapport-Additifs_1.pdf
- Oveisli M., Kaleibar B. P., Mashhadi H. R., Müller-Schärer H., Bagheri A., Amani M., Elahinejad M., Masoumi D., 2021. Bean cultivar mixture allows reduced herbicide dose while maintaining high yield: A step towards more eco-friendly weed management. *European Journal of Agronomy*, 122, 126173. DOI : 10.1016/j.eja.2020.126173
- Palou L., Ali A., Fallik E., Romanazzi G., 2016. GRAS, plant — and animal-derived compounds as alternatives to conventional fungicides for the control of postharvest diseases of fresh horticultural produce. *Postharvest Biology and Technology*, 122, 41-52. DOI : 10.1016/j.postharvbio.2016.04.017
- Palou L., Valencia-Chamorro S. A., Pérez-Gago M. B., 2015. Antifungal Edible Coatings for Fresh Citrus Fruit: A Review. *Coatings*, 5(4), 962-986. DOI : 10.3390/coatings5040962
- Pantazopoulou C. K., Bongers F. J., Küpers J. J., Reinen E., Das D., Evers J. B., Anten N. P. R., Pierik R., 2017. Neighbor detection at the leaf tip adaptively regulates upward leaf movement through spatial auxin dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(28), 7450-7455. DOI : 10.1073/pnas.1702275114
- Papaïx J., David O., Lannou C., Monod H., 2013. Dynamics of Adaptation in Spatially heterogeneous Metapopulations. *PLoS One*, 8(2), e54697. DOI : 10.1371/journal.pone.0054697
- Paracchini M., Petersen J., Hoogeveen Y., Bamps C., Burfield I., Van Swaay C., 2008. High Nature Value Farmland in Europe — An Estimate of the Distribution Patterns on the Basis of Land Cover and Biodiversity Data. Publications Office, EUR23480 EN, Luxembourg (Luxembourg), OPOCE. JRC47063. DOI : 10.2788/8891
- Parfitt J., Barthel M., MacNaughton S., 2010. Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065-3081. DOI : 10.1098/rstb.2010.0126
- Parniske M., 2008. Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbiosis. *Nature Reviews Microbiology*, 6, 763-775. DOI : 10.1038/nrmicro1987
- Parsons K., 2019. Brief 3: Integrated Food Policy — What is it and how can it help connect food systems, in *Rethinking Food Policy: A Fresh Approach to Policy and Practice*, Centre for Food Policy, London (UK).
- Paut R., Sabatier R., Dufils A., Tchamitchian M., 2021. 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. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.103011
- 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. DOI : 10.1080/1523908X.2020.1806047
- Pe'er G., Finn J. A., Díaz M., Birkenstock M., Lakner S., Röder N., Kazakova Y., Šumrada T., Bezák P., Concepción E. D., Dänhardt J., Morales M. B., Raci I., Špulerová J., Schindler S., Stavrínides M., Targetti S., Viaggi D., Vogiatzakis I. N., Guyomard H., 2022. How can the European Common Agricultural Policy help halt biodiversity loss? Recommendations by over 300 experts. *Conservation Letters*, 15(6), e12901. DOI : 10.1111/conl.12901
- Peerzada A. M., Chauhan B. S., 2018. Thermal Weed Control: History, Mechanisms, and Impacts, in Khawar Jabran K., Bhagirath S. Chauhan B. S., *Non-Chemical Weed Control*, Academic Press, 9-31. DOI : 10.1016/B978-0-12-809881-3.00002-4
- Peltonen-Sainio P., Jauhiainen L., 2019. Unexploited potential to diversify monotonous crop sequencing at high latitudes. *Agricultural Systems*, 174, 73-82. DOI : 10.1016/j.agsy.2019.04.011

- Peltonen-Sainio P., Jauhainen L., Hakala K., 2009. Are there indications of climate change induced increases in variability of major field crops in the northernmost European conditions? *Agricultural and Food Science*, 18(3-4), 206-222. DOI : 10.2137/145960609790059424
- 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. *Agricultural Systems*, 184, 102893. DOI : 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, July 1-5, Chania (Greece), IFSA.
- Pergner I., Lippert C., 2023. On the effects that motivate pesticide use in perspective of designing a cropping system without pesticides but with mineral fertilizer — a review. *Agronomy of Sustainable Development*, 43(2), 1-22. DOI : 10.1007/s13593-023-00877-w
- Petit S., Alignier A., Colbach N., Joannon A., Le Cœur D., Thenail C., 2012. Weed dispersal by farming at various spatial scales. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 205-217. DOI : 10.1007/s13593-012-0095-8
- Petit S., Cordeau S., 2020. Gestion des adventices par les régulations biologiques, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malusa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 121-134.
- Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., Guillemin J.-P., Steinberg C., 2018. Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(48). DOI : 10.1007/s13593-018-0525-3
- Pierik R., Mommer L., Voensek L. A. C. J., 2013. Molecular mechanisms of plant competition: Neighbour detection and response strategies. *Functional Ecology*, 27(4), 841-853. DOI : 10.1111/1365-2435.12010
- Piet L., 2018. Évolution des structures agricoles : quelques grandes tendances en France et dans l'Union européenne. *Cahiers du Développement Coopératif*, 3, 19-23. <https://hal.inrae.fr/hal-02624943/document>
- Pieterse C. M. J., Zamioudis C., Berendsen R. L., Weller D. M., Van Wees S. C. M., Bakker P. A. H. M., 2014. Induced Systemic Resistance by Beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347-375. DOI : 10.1146/annurev-phyto-082712-102340
- Pineda E., Poelman M. P., Aaspõllu A., Bica M., Bouzas C., Carrano E., De Miguel-Etayo P., Djojoseparto S., Gabrijelčić Blenkuš M., Graca P., Geffert K., Hebestreit A., Helldan A., Henjum S., Huseby C. S., Gregório M. J., Kamphuis C., Laatikainen T., Løvhaug A. L., Leydon C., Luszczynska A., Mäki P., Martínez J. A., Raulio S., Romaniuk P., Roos G., Salvador C., Sassi F., Silano M., Sotlar I., Specchia M. L., Telo de Arriaga M., Terragni L., Torheim L. E., Tur J. A., von Philipsborn P., Harrington J. M., Vandevijvere S., 2022. Policy implementation and priorities to create healthy food environments using the Healthy Food Environment Policy Index (Food-EPI): A pooled level analysis across eleven European countries. *The Lancet Regional Health — Europe*, 23, 100522.
- Plénet D., Simon S., Vercambre G., Lescouret F., 2010. Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits. *Innovations Agronomiques*, 9, 85-105. DOI : 10.17180/rq85-hg98
- Poniso 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 Science*, 282(1799), 20141396. DOI : 10.1098/rspb.2014.1396
- Ponti (de) T., Rijk B., Van Ittersum M. K., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural systems*, 108, 1-9. DOI : 10.1016/j.agsy.2011.12.004
- Popescu A., 2013. Considerations on utilized agricultural land and farm structure in the European Union. *Scientific Papers, Series Management, Economic, Engineering in Agricultural and Rural Development*, 13(4). https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol3_4/Art35.pdf
- Porat R., Lichter A., Terry L. A., Harker R., Buzby J., 2018. Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers' homes: Quantifications, causes, and means of prevention. *Postharvest Biology and Technology*, 139, 135-149. DOI : 10.1016/j.postharvbio.2017.11.019
- Potters J., Collins K., Schoorlemmer H., Stræte E. P., Kilis E., Lane A., Leloup H., 2022. Living Labs as an Approach to Strengthen Agricultural Knowledge and Innovation Systems. *EuroChoices*, 21(1), 23-29. DOI : 10.1111/1746-692X.12342
- Poux X., Aubert P.-M., 2018. An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-ASCA, Study n°09/18, Paris (France), 74 p. <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201809-ST0918EN-tyfa.pdf>

- Prager K., Knierim A., Labarthe P., Madureira L., Dirimanova V., Kania J., 2015. Perspectives sur le soutien aux agriculteurs : services de conseil dans les systèmes de connaissances et d'information agricole (AKIS), PROAKIS project, 8 p. https://430a.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/430a/PRO_AKIS/About/FRENCH.PROAKIS_French_final_PRINT.pdf
- Pumariño L., Sileshi G. W., Gripenberg S., Kaartinen R., Barrios E., Muchane M. N., Midega C., Jonsson M., 2015. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 16(7), 573-582. DOI : 10.1016/j.baee.2015.08.006
- Purseigle F., Nguyen G., Mazenc L., 2017. Anatomie de firmes agricoles, Les dimensions d'un basculement, in Purseigle F., Nguyen G., Blanc P. (coord.), *Le nouveau capitalisme agricole. De la ferme à la firme*, Paris, Presses de SciencesPo, 29-64. DOI : 10.3917/scpo.purse.2017.01.0029
- Puska P., Jaini P., 2020. The North Karelia Project: Prevention of Cardiovascular Disease in Finland Through Population-Based Lifestyle Interventions. *American journal of lifestyle medicine*, 14(5), 495-499. DOI : 10.1177/1559827620910981
- Ramirez R., Selin C., 2014. Plausibility and probability in scenario planning. *Foresight*, 16(1), 54-74. DOI : 10.1108/FS-08-2012-0061
- Ramsden M. W., Kendall S. L., Ellis S. A., Berry P. M., 2017. A review of economic thresholds for invertebrate pests in UK arable crops. *Crop Protection*, 96, 30-43. DOI : 10.1016/j.cropro.2017.01.009
- Ratnadas 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. DOI : 10.1007/s13593-011-0022-4
- Ravensberg W., 2015. Crop protection in 2030: towards a natural, efficient, safe and sustainable approach, Biopesticides innovative technologies and strategies for pest control, International Symposium, Swansea University, September 7-9, IBMA. <https://ibma-global.org/wp-content/uploads/2020/12/201509wrepresentationinswansea.pdf>
- Ravigné V., Halkett F., Tollenaere C., 2021. Coévolution plantes-parasites en populations naturelles, in Lannou C., Roby D., Ravigné V., Hannachi M., Moury B. (coord.), *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies*, Versailles, éditions Quæ, 115-123.
- Ray D. K., Foley J. A., 2013. Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. *Environmental Research Letters*, 8(4), 44-41. DOI : 10.1088/1748-9326/8/4/044041
- Raymond (de) A. B., Bonnaud L., 2014. Beyond the Public-Private Divide: GLOBALGAP as a Regulation Repository for Farmers. *International Journal of Sociology of Agriculture and Food*, 21(2), 227-246.
- Razinger J., Vasileiadis V. P., Giraud M., van Dijk W., Modic Š., Sattin M., Urek G., 2016. On-farm evaluation of inundative biological control of *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) by *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) in three European maize-producing regions. *Pest Management Science*, 72(2), 246-254. DOI : 10.1002/ps.4054
- Reboud X., Bedoussac L., Cellier F., 2022. Mobiliser les agroéquipements et les numériques pour des systèmes de culture sans pesticides, in Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Malausa T., Reboud X., Huyghe C. (coord.), *Zéro pesticide, Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Versailles, éditions Quæ, 177-194. DOI : 10.35690/978-2-7592-3311-3
- Reboud X., Carpentier A., Aubertot J.-N., Lemarié S., Dubois Peyrard N., Turenne N., Roussey C., avec la collaboration de Couture S., Cellier V., Gaba S., Sabbadin R., Cros M.-J., Toquebeuf P., Bonroy O., Barbier M., Charbonnier E., 2017. Ce que l'épidémiologie apporte ou n'apporte pas encore à la moindre dépendance aux produits phytopharmaceutiques. *Innovations Agronomiques*, 59, 81-91. DOI : 10.15454/1.513843982495753E12
- Redlich S., Martin E. A., Steffan-Dewenter I., 2018. Landscape-level crop diversity benefits biological pest control. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2419-2428. DOI : 10.1111/1365-2664.13126
- Reganold J. P., Wachter J. M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2, 15221, 1-8. DOI : 10.1038/nplants.2015.221
- Reidsma P., Tekelenburg T., van den Berg M., Alkemade R., 2006. Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(1), 86-102. DOI : 10.1016/j.agee.2005.11.026

- Reisig D. D., Bacheler J. S., Herbert D. A., Kuhar T., Malone S., Philips C., Weisz R., 2012. Efficacy and Value of Prophylactic vs. Integrated Pest Management Approaches for Management of Cereal Leaf Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) in Wheat and ramifications for Adoption by Growers. *Journal of Economic Entomology*, 105(5), 1612-1619. DOI : 10.1603/EC12124
- Renting H., Marsden T. K., Banks J., 2003. Understanding Alternative Food Networks: Exploring the Role of Short Food Supply Chains in Rural Development. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 35(3), 393-411. DOI : 10.1068/a3510
- Riccardi G., Vitale M., Vaccaro O., 2020. Are Europeans moving towards dietary habits more suitable for reducing cardiovascular disease risk? *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases: NMCD*, 30(11), 1857-1860. DOI : 10.1016/j.numecd.2020.07.018
- Rigal S., Dakos V., Alonso H., Aunuiš A., Benkő Z., Brotons L., Chodkiewicz T., Chylarecki P., de Carli E., del Moral J. C., Domša C., Escandell V., Fontaine B., Foppen R., Gregory R., Harris S., Herrando S., Husby M., Ieronymidou C., Jiguet F., Kennedy J., Klvaňová A., Kmecl P., Kuczyński L., Kurlavičius P., Kålås J. A., Lehikoinen A., Lindström A., Lorillière R., Moshøj C., Nellis R., Noble D., Palm Eskildsen D., Paquet J.-Y., Péliissié M., Pladevall C., Portolou D., Reif J., Schmid H., Seaman B., Szabo Z. D., Szép T., Tellini Florenzano G., Teufelbauer N., Trautmann S., van Turnhout C., Vermouzek Z., Vikstrøm T., Voříšek P., Weiserbs A., Devicor V., 2023. Farmland practices are driving bird population decline across Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(21), e221657312. DOI : 10.1073/pnas.2216573120
- Ritchey T., 2011. Modeling Alternative Futures with General Morphological Analysis. *World Future Review*, 3(1), 83-94. DOI : 10.1177/194675671100300105
- Rittel H. W. J., Webber M. M., 1973. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4, 155-169. DOI : 10.1007/BF01405730
- Rizzati V., Briand O., Guillou H., Gamet-Payrastré L., 2016. Effects of pesticide mixtures in human and animal models: An update of the recent literature. *Chemico-biological interactions*, 254, 231-246. DOI : 10.1016/j.cbi.2016.06.003
- Rizzo D., Ritz S., Combaud A., 2020. Mastering Agtech Again: Emerging of New Training Offers and Intermediate Players. *Rural Development*, 2019(1), 57-61. DOI : 10.15544/RD.2019.044
- Robin D. C., Marchand P. A., 2019. Evolution of the biocontrol active substances in the framework of the European Pesticide Regulation (EC), n°1107/2009. *Pest Management Science*, 75(4), 950-958. DOI : 10.1002/ps.5199
- Robinson J. B., 1982. Energy backcasting. A proposed method of policy analysis. *Energy policy*, 10(4), 337-344. DOI : 10.1016/0301-4215(82)90048-9
- Robinson C., Portier C. J., Čavoški A., Mesnage R., Roger A., Clausing P., Whaley P., Muilerman H., Lyssimachou A., 2020. Achieving a High Level of Protection from Pesticides in Europe: Problems with the Current Risk Assessment Procedure and Solutions. *European Journal of Risk Regulation*, 11(3), 450-480. DOI : 10.1017/err.2020.18
- Roby D., 2021. L'immunité végétale : comment les plantes résistent à leurs bioagresseurs, in Lannou C., Roby D., Ravigné V., Hannachi M., Moury B. (coord.), *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies*, Versailles, éditions Quæ, 23-25.
- Rodriguez A., 2018a. Gestion de la flore adventice en agriculture biologique, in Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 221-230.
- Rodriguez A., 2018b. Le désherbage mécanique en grandes cultures, in Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 231-244.
- Roguet C., Gaigné C., Chatellier V., Cariou S., Carlier M., Chenut R., Daniel K., Perrot C., 2015. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes : état des lieux et facteurs explicatifs. *Inra Productions Animales*, 28(1), 5-22. DOI : 10.20870/productions-animales.2015.28.1.3007
- Roig-Villanova I., Martínez-García J. F., 2016. Plant Responses to Vegetation Proximity: A Whole Life Avoiding Shade. *Frontiers in Plant Science*, 7, 236. DOI : 10.3389/fpls.2016.00236
- Rolfé S. A., Griffiths J., Ton J., 2019. Crying out for help with root exudates: Adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health-promoting soil microbiomes. *Current Opinion in Microbiology*, 49, 73-82. DOI : 10.1016/j.mib.2019.10.003
- Rose D. C., Lyon J., de Boon A., Hanheide M., Pearson S., 2021. Responsible development of autonomous robotics in agriculture. *Nature Food*, 2, 306-309. DOI : 10.1038/s43016-021-00287-9
- Rosol M., Barbosa Jr. R., 2021. Moving beyond direct marketing with new mediated models: evolution of or departure from alternative food networks? *Agriculture and Human Values*, 38, 1021-1039. DOI : 10.1007/s10460-021-10210-4

- Ross R. P., Morgan S., Hill C. 2002. Preservation and fermentation: past, present and future. *International Journal of Food Microbiology*, 79(1-2), 3-16. DOI : 10.1016/S0168-1605(02)00174-5
- Rowen E., Tooker J. F., Carmen K., Blubaugh C. K., 2019. Managing fertility with animal waste to promote arthropod pest suppression. *Biological Control*, 134, 130-140. DOI : 10.1016/j.biocontrol.2019.04.012
- Roy H., Wajnberg E., 2008. From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species. *BioControl*, 53(1), 1-4. DOI : 10.1007/s10526-007-9127-8
- Ruffieux B., Level A., 2024. *Le marché alimentaire à horizon 2050 en France. Du libre-service aux plateformes de e-commerce*, Versailles, éditions Quæ, 186 p.
- Rusch A., 2020. Gestion agroécologique des insectes ravageurs de la parcelle aux paysages, in Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 109-119.
- Rusch A., Bommarco R., Ekbohm B., 2016b. Conservation Biological Control in Agricultural Landscapes. *Advances in Botanical Research*, 81, 333-360. DOI : 10.1016/bs.abr.2016.11.001
- Rusch A., Chaplin-Kramer R., Gardiner M. M., Hawro V., Holland J., Landis D., Thies C., Tschamtk T., Weisser W. W., Winqvist C., Woltz M., Bommarco R., 2016a. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204. DOI : 10.1016/j.agee.2016.01.039
- Rusch A., Valantin-Morison M., Sarthou J.-P., Roger-Estrade J., 2010. Biological Control of Insect Pests in Agroecosystems: Effects of Crop Management, Farming Systems, and Seminatural Habitats at the Landscape Scale: A Review. *Advances in Agronomy*, 109, 219-259. DOI : 10.1016/B978-0-12-385040-9.00006-2
- Russel P. E., 2005. A century of fungicide evolution. *The Journal of Agricultural Science*, 143(1), 11-25. DOI : 10.1017/S0021859605004971
- Saba A. Vassallo M., Shepherd R., Lampila P., Arvola A., Dean M., Winkelmann C., Claupein E., Lähteenmäki L., 2010. Country-wise differences in perception of health-related messages in cereal-based food products. *Food Quality and Preference*, 21(4), 385-393. DOI : 10.1016/j.foodqual.2009.09.007
- Saile M., Spaeth M., Schwarz J., Bahrs E., Claß-Mahler I., Gerhards R., 2023. Weed control in a pesticide-free farming system with mineral fertilisers. *Weed Research*, 63(3), 196-206. DOI : 10.1111/wre.12581
- 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. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102856
- Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K. A. G., 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. DOI : 10.1016/j.biocon.2019.01.020
- Sanner E.-A., Bouville R., Sarthou V., 2022. Agriculture biologique : Définition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. DOI : 10.17180/2vd1-kx96
- Savary S., Willocquet L., Pethybridge S. J., Esker P., McRoberts N., Nelson A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430-439. DOI : 10.1038/s41559-018-0793-y
- Scheper J., Holzschuh A., Kuussaari M., Potts S. G., Rundlöf M., Smith H. G., Kleijn D., 2013. Environmental factors driving the effectiveness of European agri-environmental measures in mitigating pollinator loss — a meta-analysis. *Ecology letters*, 16(7), 912-920. DOI : 10.1111/ele.12128
- Schiffers B., 2012. Les pesticides ou le mythe de Prométhée revisité, Rentrée académique 2012 — Leçon inaugurale, Gembloux (Belgique). <https://hdl.handle.net/2268/212918>
- Schlatter D., Kinkel L., Thomashow L., Weller D., Paulitz T. 2017. Disease Suppressive Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology*, 107(11), 1284-1297. DOI : 10.1094/PHYTO-03-17-0111-RWW
- Schnebelin É., Labarthe P., Touzard J.-M., 2021. How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System. *Journal of Rural Studies*, 86, 599-610. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.07.023
- 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(5), 276-291. DOI : 10.1051/ocl.2010.0334
- Schott C., Puech T., Mignolet C., 2018. Dynamiques passées des systèmes agricoles en France : une spécialisation des exploitations et des territoires depuis les années 1970. *Fourrages*, 235, 153-161.

- Schuh B., Maucorps A., Münch A., Brkanovic S., Dwyer S., Viganì M., Khafagy A., Coto Sauras M., Deschelle P., Lopez A., Severini S., Antoniolli F., Gaugitsch R., Powell J., Kubinakova K., Derszniak-Noirjean M., Salasan C., Gaupp-Berghausen M., Hsiung C.-H., Fasching F., Keringer F., 2019. Research for AGRI Committee — The EU farming employment: current challenges and future prospects, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels (Belgium). [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2019\)629209](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2019)629209)
- Schulz R., Bub S., Petschick L. L., Stehle S., Wolfram J., 2021. Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops. *Science*, 372(6537), 81-84. DOI : 10.1126/science.abe1148
- Schumer H., Amadi C., Joshi A., 2018. Evaluating the Dietary and Nutritional Apps in the Google Play Store. *Healthcare Informatics Research*, 24(1), 38-45. DOI : 10.4258/hir.2018.24.1.38
- Secondi L., Principato L., Laureti T., 2015. Household food waste behaviour in EU-27 countries: A multilevel analysis. *Food Policy*, 56, 25-40. DOI : 10.1016/j.foodpol.2015.07.007
- Semchenko M., Saar S., Lepik A., 2014. Plant root exudates mediate neighbour recognition and trigger complex behavioural changes. *New Phytologist*, 204(3), 631-637. DOI : 10.1111/nph.12930
- Seufert V., Ramankutty N., Foley J. A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-32. DOI : 10.1038/nature11069
- Shahzad M. A., Fischer C., 2021. The State of Other Gainful Activities in European Union-27: An Empirical Analysis of Trends and Determinants Factors, International Association of Agricultural Economists, Conference, August 17-31. DOI : 10.22004/ag.econ.315226
- Sieglwart M., Lavoit A.-V., 2020. Les substances naturelles d'origine végétale utilisées comme produits de biocontrôle, in Fauvègue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T., Lannou C. (coord.), *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 173-183.
- Siga, 2021. Application mobile — Siga.care.
- Silva V., Mol H. G. M., Zomer P., Tienstra M., Ritsema C. J., Geissen V., 2019. Pesticide residues in European agricultural soils — A hidden reality unfolded. *Science of The Total Environment*, 653, 1532-1545. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.10.441
- Sim J. X., Drigo B., Doolette C. L., Vasileiadis S., Karpouzias D. G., Lombi E., 2022. Impact of twenty pesticides on soil carbon microbial functions and community composition. *Chemosphere*, 307(Part 2), 135820. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2022.135820
- Simon S., 2019. Repenser le verger pour produire des fruits sans pesticides. *Jardins de France*, 655, 64-67. <https://www.jardinsdefrance.org/repenser-le-verger-pour-produire-des-fruits-sans-pesticides/>
- Simon J.-C., Marchesi J. R., Mougèl C., Selosse M.-A., 2019. Host-microbiota interactions: from holobiont theory to analysis. *Microbiome*, 7(5). DOI : 10.1186/s40168-019-0619-4
- Singhal V., Ghosh J., Jinger D., 2020. Cover crop technology — a way towards conservation agriculture: A review. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 90(12), 2275-84. DOI : 10.56093/ijas.v90i12.110310
- Sirami C., Gross N., Bøsem Baillod A., Bertrand C., Carrié R., Hass A., Henckel L., Miguet P., Vuillot C., Alignier A., Girard J., Batáry P., Clough Y., Violle C., Giralte D., Bota G., Badenhausser I., Lefebvre G., Gauffre B., Vialatte A., Calatayud F., Gil-Tena A., Tischendorf L., Mitchell S., Lindsay K., Georges R., Hilaire S., Recasens J., Oriol Solé-Senan X., Robleño I., Bosch J., Barrientos J. A., Ricarte A., Marcos-García M. Á., Miñano J., Mathevet R., Gibon A., Baudry J., Balent G., Poulin B., Burel F., Tschamtké T., Bretagnolle V., Siriwardena G., Ouin A., Brotons L., Martin J.-L., Fahrig L., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33), 16442-16447. DOI : 10.1073/pnas.1906419116
- Sivakumar D., Bautista-Baños S., 2014. A review on the use of essential oils for postharvest decay control and maintenance of fruit quality during storage. *Crop Protection*, 64, 27-37. DOI : 10.1016/j.cropro.2014.05.012
- 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. DOI : 10.1016/j.njas.2012.09.001
- Smith S. E., Smith F. A., 2012. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*, 104(1), 1-13. DOI : 10.3852/11-229
- Snyder L. D., Gómez M. I., Power A. G., 2020. Crop Varietal Mixtures as a Strategy to Support Insect Pest Control, Yield, Economic, and Nutritional Services. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(60). DOI : 10.3389/fsufs.2020.00060
- Song Y. Y., Ye M., Li C., He X., Zhu-Salzman K., Wang R. L., Su Y. J., Luo S. M., Zeng R. S., 2014. Hijacking common mycorrhizal networks for herbivore-induced defence signal transfer between tomato plants. *Scientific Reports*, 4, 1-8. DOI : 10.1038/srep03915

- Song Y. Y., Zeng R. S., Xu J. F., Li J., Shen X., Yihdego W. G., 2010. Interplant Communication of Tomato Plants through Underground Common Mycorrhizal Networks. *PLoS One*, 5, e13324. DOI : 10.1371/journal.pone.0013324
- Sponsler D. B., Grozinger C. M., Hitaj C., Rundlöf M., Botías C., Code A., Lonsdorf E. V., Melathopoulos A. P., Smith D. J., Suryanarayanan S., Thogmartin W. E., Williams N. M., Zhang M., Douglas M. R., 2019. Pesticides and pollinators: A socioecological synthesis. *Science of The Total Environment*, 662, 1012-1027. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2019.01.016
- Stenberg J. A., 2017. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends in Plant Science*, 22(9), 759-769. DOI : 10.1016/j.tplants.2017.06.010
- Stomph T., Dordas C., Baranger A., de Rijk J., Dong B., Evers J., Gu C., Long L., Simon J., Jensen E. S., Wang Q., Wang Y., Wang Z., Xu H., Zhang C., Zhang L., Zhang W.-P., Bedoussac L., van der Werf W., 2020. Designing inter-crops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles? *Advances in agronomy*, 160(1), 1-50. DOI : 10.1016/bs.agron.2019.10.002
- Storck V., Karpouzias D. G., Martin-Laurent F., 2017. Towards a better pesticide policy for the European Union. *Science of The Total Environment*, 575, 1027-1033. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2016.09.167
- Strand J. F., 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1-2), 73-82. DOI : 10.1016/S0168-1923(00)00119-2
- Sturrock R. N., Frankel S. J., Brown A. V., Hennon P. E., Kliejunas J. T., Lewis K. J., Worrall J. J., Woods A. J., 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60(1), 133-149. DOI : 10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x
- Sud M., 2020. Managing the biodiversity impacts of fertiliser and pesticide use: Overview and insights from trends and policies across selected OECD countries. *OECD Environment Working Papers*, n°155, Paris, Éditions OCDE. DOI : 10.1787/63942249-en
- Sudres M., Bastian A., Bedoussac L., Justes E., 2022. Culture intermédiaire : Définition, in *Dictionnaire d'agronomie*. DOI : 10.17180/sgqf-rb24
- Tamminga S., 2003. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production. *Livestock Production Science*, 84(2), 101-111. DOI : 10.1016/j.livprodsci.2003.09.008
- Tang F. H. M., Lenzen M., McBratney A., Maggi F., 2021. Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience*, 14, 206-210. DOI : 10.1038/s41561-021-00712-5
- Thérond O., Duru M., Roger-Estrade J., Richard G., 2017. A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 1-24. DOI : 10.1007/s13593-017-0429-7
- Tian L., Lin X., Tian J., Ji L., Chen Y., Phan Tran L.-S., Tian C., 2020. Research advances of beneficial microbiota associated with crop plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(5), 1795. DOI : 10.3390/ijms21051792
- Tibi A., Debaeke P., Ben Ari T., Bérard A., Bispo A., Charcosset A., Durand J.-L., Le Gouis J., Makowski D., Marrou H., Planton S., Sauquet E., Savary S., Willocquet L., Guyomard H., Schmitt B., 2020. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire, rapport de synthèse de l'étude, INRAE, France. DOI : 10.15454/p12p-ct85
- Tibi A., Martinet V., Vialatte A. (coord.), 2023. *Protéger les cultures par la diversité végétale*, Versailles, éditions Quæ, 135 p.
- Tilman D., Clark M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522. DOI : 10.1038/nature13959
- Toffolini Q., Capitaine M., Hannachi M., Cerf M., 2021. Implementing agricultural living labs that renew actors' roles within existing innovation systems: A case study in France. *Journal of Rural Studies*, 88, 157-168. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.10.015
- Tooker J. F., Frank S. D., 2012. Genotypically diverse cultivar mixtures for insect pest management and increased crop yields. *Journal of Applied Ecology*, 49(5), 974-985. DOI : 10.1111/j.1365-2664.2012.02173.x
- Topping C. J., Aldrich A., Bery P., 2020. Overhaul environmental risk assessment for pesticides. *Science*, 367(6476), 360-363. DOI : 10.1126/science.aay1144
- Tosi M., Radice D., Carioni G., Vecchiati T., Fiori F., Parpinel M., Gnagnarella Sc. M. P., 2021. Accuracy of applications to monitor food intake: Evaluation by comparison with 3-d food diary. *Nutrition*, 84, 111018. DOI : 10.1016/j.nut.2020.111018
- Tosi S., Sfeir C., Carnesecchi E., vanEngelsdorp D., Chauzat M. P., 2022. Lethal, sublethal, and combined effects of pesticides on bees: A meta-analysis and new risk assessment tools. *Science of The Total Environment*, 844, 156857. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2022.156857

- Tourdonnet (de) S., Barbier J.M., Courty S., Martel P., Lucas V., 2018. How can collective organization and the search for autonomy lead to an agroecological transition? The example of farm machinery cooperatives in France, European IFSA Symposium, Chania (Greece). DOI : <https://hal.science/hal-01834752v1>
- Trémoussaygue D., Deslandes L., 2021. Les formes connues de l'immunité chez les plantes : la cellule végétale sous haute surveillance, in Lannou C., Roby D., Ravigné V., Hannachi M., Moury B. (coord.), *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies*, Versailles, éditions Quæ, p. 27-37.
- Trivedi P., Schenk P. M., Matthew D., Wallenstein M. D., Singh B. K., 2017. Tiny Microbes, Big Yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 999-1003. DOI : 10.1111/1751-7915.12804
- Tscharntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T. O., Kleijn D., Rand T. A., Tylianakis J. M., van Nouhuys S., Vidal S., 2007. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological Control*, 43(3), 294-309. DOI : 10.1016/j.biocontrol.2007.08.006
- Tscharntke T., Grass I., Wanger T. C., Westphal C., Batáry P., 2021. Beyond organic farming — harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 36 (10), 919-930. DOI : 10.1016/j.tree.2021.06.010
- Tscharntke T., Karp D. S., Chaplin-Kramer R., Batáry P., DeClerck F., Gratton C., Hunt L., Ives A., Jonsson M., Larsen A., Martin E. A., Martínez-Salinas A., Meehan T. D., O'Rourke M., Poveda K., Rosenheim J. A., Rusch A., Schellhorn N., Wanger T. C., Wratten S., Zhang W., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control — Five hypotheses. *Biological Conservation*, 204(Part B), 449-458. DOI : 10.1016/j.biocon.2016.10.001
- Tscharntke T., Klein A. M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity—ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8, 857-874. DOI : 10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x
- Tuck S. L., Winqvist C., Mota F., Ahnström J., Turnbull L. A., Bengtsson J., 2014. Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 51(3), 746-755. DOI : 10.1111/1365-2664.12219
- Tukes, 2021. Harmonized risk indicators. <https://tukes.fi/en/safe-use-of-plant-protection-products/harmonised-risk-indicators>
- UFC-Que Choisir, 2021a. Labels alimentaires et signes de qualité. Promesses non tenues : une révision s'impose ! [WWW Document]. *UFC-Que Choisir*. <https://www.quechoisir.org/action-ufc-que-choisir-labels-alimentaires-et-signes-de-qualite-promesses-non-tenues-une-revision-s-impose-n94920/>
- UFC-Que Choisir, 2021b. Appli QuelProduit. Une application gratuite pour choisir ses produits alimentaires, cosmétiques et ménagers [WWW Document]. UFC-Que Choisir. <https://www.quechoisir.org/application-mobile-quelproduit-n84731/>
- UN (United Nations), 2017. *World Population Prospects: the 2017 Revision. Key findings and advance tables*. Working Paper N°ESA/P/WP/248, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York. <https://desapublications.un.org/file/624/download>
- Urban L., Aarouf J., Chabane Sari D., Orsal B., 2017. Method for stimulating the resistance of plants to biotic stress by UV radiation exposure, patent WO/2017/046389.
- Urgenci, 2016. Overview of community supported agriculture in Europe. European CSA Research Group. <https://urgenci.net/wp-content/uploads/2016/05/Overview-of-Community-Supported-Agriculture-in-Europe.pdf>
- Urruty N., Tailliez-Lefebvre D., Huyghe C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 15. DOI : 10.1007/s13593-015-0347-5
- Valiorgue B., Bourlier Bargues É., Hollandts X., 2020. Quelles évolutions de la raison d'être des coopératives agricoles françaises ? Regard historique sur un construit social. *RECMA*, 358, 23-38. DOI : 10.3917/recma.358.0023
- Vallavieille-Pope (de) C., Belhaj Fraj M., Mille B., Meynard J.M., 2006. Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. *Dossiers de l'environnement de l'Inra*, 30, 101-109. <https://hal.inrae.fr/view/index/identifiant/hal-02661356>
- Van Apeldoorn D. F., Kok K., Sonneveld M. P. W., Veldkamp A., 2011. Panarchy Rules: Rethinking Resilience of Agroecosystems, Evidence from Dutch Dairy-Farming. *Ecology and Society*, 16(1), 39. DOI : 10.5751/ES-03949-160139
- van der Ploeg J. D., Barjolle D., Bruil J., Brunori G., Costa Madureira L. M., Dessein J., Drag Z., Fink-Kessler A., Gasselín P., Gonzalez de Molina M., Grolach K., Jürgens K., Kinsella J., Kirwan J., Knickel K., Lucas V., Marsden T., Maye D., Migliorini P., Milone P., Noe E., Nowak P., Parrott N., Peeters A., Rossi A., Schermer M., Ventura F., Visser M., Wezel A., 2019. The economic potential of agroecology: Empirical evidence from Europe. *Journal of Rural Studies*, 71, 46-61. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2019.09.003

- van der Ploeg J. D., Franco J. C., Borras Jr S. M., 2015. Land concentration and land grabbing in Europe: a preliminary analysis. *Canadian Journal of Development Studies*, 36(2), 147-162. DOI : 10.1080/0225189.2015.1027673
- Vandevijvere S., Jaacks L. M., Monteiro C. A., Moubarac J. C., Girling-Butcher M., Lee A. C., Pan A., Bentham J., Swinburn B., 2019. Global trends in ultraprocessed food and drink product sales and their association with adult body mass index trajectories. *Obesity Reviews*, 20(S2), 10-19. DOI : 10.1111/obr.12860
- Vandevijvere S., Swinburn B.; Informas (International Network for Food and Obesity/non-communicable diseases [NCDs] Research, Monitoring and Action Support), 2015. Pilot test of the Healthy Food Environment Policy Index (Food-EPI) to increase government actions for creating healthy food environments. *BMJ Open*, 5(1), e006194. DOI : 10.1136/bmjopen-2014-006194
- van Frank G., Rivière P., Pin S., Baltassat R., Berthelot J.-F., Caizergues F., Dalmasso C., Gascuel J.-S., Hyacinthe A., Mercier F., Montaz H., Ronot B., Goldringer I., 2020. Genetic Diversity and Stability of Performance of Wheat Population Varieties Developed by Participatory Breeding. *Sustainability*, 12(1), 384. DOI : 10.3390/su12010384
- Vanhala P., Lötjönen T., Hurme T., 2006. Managing *Sonchus arvensis* using mechanical and cultural methods. *Agricultural and Food Science*, 15(4), 444-458. DOI : 10.2137/145960606780061498
- Van Klompenburg T., Kassahun A., Catal C., 2020. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709. DOI : 10.1016/j.compag.2020.105709
- van Lenteren J. C., 2000. A greenhouse without pesticides: fact or fantasy? *Crop Protection*, 19(6), 375-384. DOI : 10.1016/S0261-2194(00)00038-7
- van Lenteren J. C., 2012. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57, 1-20. DOI : 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, 39-59. DOI : 10.1007/s10526-017-9801-4
- 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, 971-983. DOI : 10.1016/j.respol.2009.02.008
- Vannier N., Agler M., Hacquard S., 2019. Microbiota-mediated disease resistance in plants. *PLoS Pathogens*, 15(6), e1007740. DOI : 10.1371/journal.ppat.1007740
- van Vliet M., Kok K., 2015. Combining backcasting and exploratory scenarios to develop robust water strategies in face of uncertain futures. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(1), 43-74. DOI : 10.1007/s11027-013-9479-6
- Vartiainen E., 2018. The North Karelia Project: Cardiovascular disease prevention in Finland. *Global Cardiology Science & Practice*, 2018(2). DOI : 10.21542/gcsp.2018.13
- 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 & Environment*, 166, 3-14. DOI : 10.1016/j.agee.2012.08.013
- Venter Z. S., Jacobs K., Hawkins H. J., 2016. The impact of crop rotation on soil microbial diversity: A meta-analysis. *Pedobiologia – Journal of Soil Ecology*, 59(4), 215-223. DOI : 10.1016/j.pedobi.2016.04.001
- Vereecken C., Pedersen T. P., Ojala K., Krølner R., Dzielska A., Ahluwalia N., Giacchi M., Kelly C., 2015. Fruit and vegetable consumption trends among adolescents from 2002 to 2010 in 33 countries. *The European Journal of Public Health*, 25(2), 16-19. DOI : 10.1093/eurpub/ckv012
- Verret V., Gardarin A., Pelzer E., Médiène S., Makowski D., Valantin-Morison M., 2017. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 204, 158-168. DOI : 10.1016/j.fcr.2017.01.010
- Vicherová E., Glinwood R., Hájek T., Šmilauer P., Ninkovic V., 2020. Bryophytes can recognize their neighbours through volatile organic compounds. *Scientific Reports*, 10, 7405. DOI : 10.1038/s41598-020-64108-y
- Vigan M., Allain S., Choisis J.-P., Mihot S., 2022. Agroforestry: Definition, in *Dictionnaire d'agroécologie*. <https://dicoagroecologie.fr/en/dictionnaire/agroforestry/>
- Villaverde J. J., Sevilla-Morán B., Sandín-España P., López-Goti C., Alonso-Prados J. L., 2014. Biopesticides in the framework of the European Pesticide Regulation (EC), n°1107/2009. *Pest Management Science*, 70(1), 2-5. DOI : 10.1002/ps.3663
- Vincent C., Hallman G., Panneton B., Fleurat-Lessard F., 2003. Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual Review of Entomology*, 48(1), 261-281. DOI : 10.1146/annurev.ento.48.091801.112639

- 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. *Agronomy for sustainable development*, 39(5), 1-15. DOI : 10.1007/s13593-019-0590-2
- Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R. M., 2020. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports*, 39, 3-17. DOI : 10.1007/s00299-019-02447-5
- Von der Lippe M., Kowarik I., 2007. Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions. *Conservation Biology*, 21(4), 986-996. DOI : 10.1111/j.1523-1739.2007.00722.x
- Vorholt J. A., 2012. Microbial life in the phyllosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 10, 828-840. DOI : 10.1038/nrmicro2910
- Vorholt J. A., Vogel C., Carlström C. I., Müller D. B., 2017. Establishing Causality: Opportunities of Synthetic Communities for Plant Microbiome Research. *Cell Host & Microbe*, 22(2), 142-155. DOI : 10.1016/j.chom.2017.07.004
- Vo-Thanh T., Zaman M., Hasan R., Rather R. A., Lombardi R., Secundo G., 2021. How a mobile app can become a catalyst for sustainable social business: The case of Too Good To Go. *Technological Forecasting and Social Change*, 171, 120962. DOI : 10.1016/j.techfore.2021.120962
- VYR — Finnish Cereal Committee, 2014. Production of cereal and oilseed crops in Finland. https://vyr.fi/app/uploads/2024/01/inengl_1ca381b_Production_of_cereal_crops_in_Finland_2014_10.pdf
- Waha K., Dietrich J. P., Portmann F. T., Siebert S., Thornton Ph. K., Bondeau A., Herrero M., 2020. Multiple cropping systems of the world and the potential for increasing cropping intensity. *Global Environmental Change*, 64, 102131. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2020.102131
- Wallenstein M. D., 2017. Managing and manipulating the rhizosphere microbiome for plant health: A systems approach. *Rhizosphere*, 3(2), 230-232. DOI : 10.1016/j.rhisph.2017.04.004
- Walker B., Abel N., Anderies J., Ryan P., 2009. Resilience, Adaptability, and Transformability in the Gouldburn-Broken Catchment, Australia. *Ecology and Society*, 14(1), 12. DOI : 10.5751/ES-02824-140112
- Wang J., Zhou L., Shi H., Chern M., Yu H., Yi H., He M., Yin J., Zhu X., Li Y., Li W., Liu J., Wang J., Chen X., Qing H., Wang Y., Liu G., Wang W., Li P., Wu X., Zhu L., Zhou J.-M., Ronald P. C., Li S., Li J., Chen X., 2018. A single transcription factor promotes both yield and immunity in rice. *Science*, 361(6406), 1026-1028. DOI : 10.1126/science.aat7675
- Warschewsky E. J., Klein L. L., Frank M. H., Chitwood D. H., Londo J. P., von Wettberg E. J. B., Miller A. J., 2016. Rootstocks: Diversity, Domestication, and Impacts on Shoot Phenotypes. *Trends in Plant Science*, 21(5), 418-437. DOI : 10.1016/j.tplants.2015.11.008
- Waters M. T., Gutjahr C., Bennett T., Nelson D. C., 2017. Strigolactone Signaling and Evolution. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 291-322. DOI : 10.1146/annurev-arplant-042916-040925
- Wezel A., Goris M., Bruil J., Félix G. F., Peeters A., Bärberi P., Bellon S., Migliorini P., 2018. Challenges and Action Points to Amplify Agroecology in Europe. *Sustainability*, 10, 1598. DOI : 10.3390/su10051598
- WHO (World Health Organization), 2015. Fiscal policies for diet and prevention of non-communicable diseases, Technical meeting report, May 5-6, Geneva (Switzerland), 36 p. https://www.who.int/docs/default-source/obesity/fiscal-policies-for-diet-and-the-prevention-of-noncommunicable-diseases-0.pdf?sfvrsn=84ee20c_2
- Willer H., Trávníček J., Meier C., Schlatter B., 2009. The World of Organic Agriculture: Statistics and Emerging Trends 2008. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 10(1), Research Institute of Organic Agriculture FIBL, Frick and IFOAM — Organics International, Bonn. DOI : 10.1108/ijshs.2009.24910aee.004
- Willett W., Rockstrom J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., et al., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492. DOI : 10.1016/S0140-6736(18)31788-4
- Wilkins E., Wilson L., Wickramasinghe K., Bhatnagar P., Leal J., Luengo-Fernandez R., Burns R., Rayner M., Townsend N., 2017. European Cardiovascular Disease Statistics 2017 Edition, European Heart Network AISBL, Brussels (Belgium), 192 p. <https://ehheart.org/wp-content/uploads/2023/07/CVD-Statistics.pdf>
- Wińska K., Mączka W., Łyczko J., Grabarczyk M., Czubaszek A., Szumny A., 2019. Essential Oils as Antimicrobial Agents— Myth or Real Alternative? *Molecules*, 24, 1-21. DOI : 10.3390/molecules24112130
- Witzgall P., Kirsch P., Cork A., 2010. Sex Pheromones and Their Impact on Pest Management. *Journal of Chemical Ecology*, 36, 80-100. DOI : 10.1007/s10886-009-9737-y
- Wolfe M., Baresel J., Desclaux D., Goldringer I., Hoad S., Kovacs G., Löschenberger F., Miedaner T., Ostergard H., Lammerts van Bueren E., 2008. Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica*, 163, 323-346. DOI : 10.1007/s10681-008-9690-9

- Wu W., Yu Q., You L., Chen K., Tang H., Liu J., 2018. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. *Land Use Policy*, 76, 515-525. DOI : 10.1016/j.landusepol.2018.02.032
- Xu G., Yuan M., Ai C., Liu L., Zhuang E., Karapetyan S., Wang S., Dong X., 2017. uORF-mediated translation allows engineered plant disease resistance without fitness costs. *Nature*, 545 (7655), 491-494. DOI : 10.1038/nature22372
- Xynias I. N., Mylonas I., Korpetis E. G., Ninou E., Tsbaballa A., Avdikos I. D., Mavromatis A. G., 2020. Durum Wheat Breeding in the Mediterranean Region: Current Status and Future Prospects. *Agronomy*, 10(3), 432. DOI : 10.3390/agronomy10030432
- Yakhin O. I., Lubyantsev A. A., Yakhin I. A., Brown P. H., 2017. Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. DOI : 10.3389/fpls.2016.02049
- Yang X. F., Li L. L., Xu Y., Kong C. H., 2018. Kin recognition in rice (*Oryza sativa*) lines. *New Phytologist*, 220(2), 567-578. DOI : 10.1111/nph.15296
- Yap M., Ercolini D., Álvarez-Ordóñez A., O'Toole P. W., O'Sullivan O., Cotter P. D., 2022. Next-Generation Food Research: Use of Meta-Omic Approaches for Characterizing Microbial Communities Along the Food Chain. *Annual Review of Food Science and Technology*, 13(1), 361-384. DOI : 10.1146/annurev-food-052720-010751
- Zhan J., Thrall P. H., Papaix J., Xie L., Burdon J. J., 2015. Playing on a Pathogen's Weakness: Using Evolution to Guide Sustainable Plant Disease Control Strategies. *Annual Review of Phytopathology*, 53(1), 19-43. DOI : 10.1146/annurev-phyto-080614-120040
- Zhang H., Mahunu G. K., Castoria R., Yang Q., Apaliya M. T., 2018. Recent developments in the enhancement of some postharvest biocontrol agents with unconventional chemicals compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 180-187. DOI : 10.1016/j.tifs.2018.06.002
- Zhang J., Coaker G., Zhou J. M., Dong X., 2020. Plant Immune Mechanisms: From Reductionistic to Holistic Points of View. *Molecular Plant*, 13(10), 1358-1378. DOI : 10.1016/j.molp.2020.09.007
- Zhou L. H., Liu S. B., Wang P. F., Lu T. J., Xu F., Genin G. M., Pickard B. G., 2017. The Arabidopsis trichome is an active mechanosensory switch. *Plant, Cell & Environment*, 40(5), 611-621. DOI : 10.1111/pce.12728
- Ziesche T. M., Ordon F., Schliephake E., Will T., 2023. Long-term data in agricultural landscapes indicate that insect decline promotes pests well adapted to environmental changes. *Journal of Pest Science*, 97, 1281-1297. DOI : 10.1007/s10340-023-01698-2
- Zimmermann B., Claß-Mahler I., von Cossel M., Lewandowski I., Weik J., Spiller A., et al., 2021. Mineral-ecological Cropping Systems — A New Approach to Improve Ecosystem Services by Farming without Chemical Synthetic Plant Protection. *Agronomy*, 11(9), 1710. DOI : 10.3390/agronomy11091710
- Zobbe H., 2001. The Economic and Historical Foundation of the Common Agricultural Policy in Europe, Working Paper, The Royal Veterinary and Agricultural University; 22 p. DOI : 10.22004/ag.econ.24212
- Zollet S., Maharjan K. L., 2021. Resisting the vineyard invasion: Anti-pesticide movements as a vehicle for territorial food democracy and just sustainability transitions. *Journal of Rural Studies*, 86, 318-329. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.06.020

Édition : Alice Durand
Mise en page :  EliLoCom et Hélène Bonnet
En couverture : © MAITRE Christophe/INRAE

Achévé d'imprimer en février 2025 par



isiPRINT
L'IMPRESSION DANS TOUTE SA DIMENSION

139 rue Rateau
93120 La Courneuve

Numéro d'impression : 202502.0019
Dépôt légal : février 2025

Imprimé en France



D'ici 2050, de nouvelles formes d'agriculture sans pesticides chimiques sont possibles à l'échelle européenne. À quoi pourraient-elles ressembler et quelles seraient les conséquences d'une telle transformation ?

Cette prospective, réalisée par un collectif d'experts européens, propose des stratégies de rupture pour une protection des cultures sans pesticides chimiques fondées sur l'immunité des plantes, l'hologobionte de la plante cultivée et les régulations biologiques à l'échelle du paysage. Elle explore également trois scénarios et trajectoires de transition du système alimentaire, déclinés dans quatre secteurs de production et régions (Italie, Roumanie, Finlande et France). Les auteurs évaluent les impacts de ces scénarios sur la production, le commerce, le changement d'usage des terres et les émissions de gaz à effet de serre, pour l'Europe et à l'échelle globale.

Si elle implique un engagement fort de l'ensemble des acteurs de la chaîne agroalimentaire et la mise en œuvre de politiques publiques cohérentes dans les domaines qui y sont associés, cette transition n'est pas seulement une question sectorielle, elle est également un choix de société.

Destiné aux responsables politiques, administratifs et associatifs, cet ouvrage intéressera aussi les étudiants et chercheurs impliqués dans des approches interdisciplinaires sur les systèmes agricoles et alimentaires ainsi que tout citoyen soucieux de trouver des voies pour sortir des pesticides chimiques.

Coordinateur de la prospective « Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 » — à l'origine de cet ouvrage —, **Olivier Mora** est agronome, spécialiste de la prospective des systèmes agricoles et alimentaires à INRAE.

Les recherches de **Jean-Louis Drouet**, agronome bioclimatologiste à INRAE, se concentrent sur la modélisation intégrée des flux d'azote dans les agroécosystèmes.

Chantal Le Mouël est économiste à INRAE, spécialisée dans la modélisation des marchés et des échanges, en lien avec le changement d'usage des terres.

Jeanne-Alix Berne, diplômée d'AgroParisTech, travaille actuellement pour l'Iddri où elle mène des prospectives sur la transition du secteur agroalimentaire.

Ingénieure agronome d'AgroParisTech, **Claire Meunier** est spécialisée en nutrition et alimentation humaine.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

35 €

ISBN : 978-2-7592-3778-4



9 782759 237784

ISSN : 2115-1229

Réf. : 02993