



HAL
open science

Propositions pour un programme prioritaire de recherche. Cultiver et protéger autrement - Rapport d'étape

Florence Jacquet, Christian Huyghe, Robert Barouki, Frédéric Barraquand, Cédric Bertrand, Francois Cote, Jean Pierre J. P. Cravedi, Laurence Fontaine, Marie-Helene Jeuffroy, Pierre Labarthe, et al.

► To cite this version:

Florence Jacquet, Christian Huyghe, Robert Barouki, Frédéric Barraquand, Cédric Bertrand, et al.. Propositions pour un programme prioritaire de recherche. Cultiver et protéger autrement - Rapport d'étape. [Rapport de recherche] INRA; ANR; Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation; Secrétariat général pour l'investissement. 2019, pp.92. hal-02789606

HAL Id: hal-02789606

<https://hal.inrae.fr/hal-02789606v1>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



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



PROPOSITIONS POUR UN PROGRAMME PRIORITAIRE DE RECHERCHE

« CULTIVER ET PROTÉGER AUTREMENT »

Alternative aux phytosanitaires : mobiliser les leviers de l'agroécologie, du biocontrôle et de la prophylaxie pour une agriculture performante et durable



Document de travail, coordonné par :

Florence Jacquet, INRA et Christian Huyghe, Directeur Scientifique Agriculture, INRA,

Ont participé à la rédaction de ce document :

Robert Barouki (INSERM),

Frédéric Barraquand (CNRS),

Cédric Bertrand (Université de Perpignan),

François Côte (CIRAD),

Jean Pierre Cravedi (INRA),

Laurence Fontaine (Institut Technique de l'Agriculture Biologique),

Marie-Hélène Jeuffroy (INRA),

Pierre Labarthe (INRA),

Frédéric Lebeau (IRSTEA),

Edith Le Cadre (Agro Campus Ouest),

Emmanuel Lesprit (Union Française des Semenciers),

Isabelle Litrico (INRA),

Thibaut Malausa (INRA),

Camille Profizi (Agrauxine),

Xavier Reboud (INRA),

Chris Roth (ANSES),

Philippe Vissac (ACTA),

Thomas Watteyne (INRIA)

Un programme ambitieux au service d'une agriculture française « pionnière »

L'intensification de notre agriculture a permis de garantir les volumes de nos productions alimentaires, ce qui était un enjeu majeur de l'après-guerre. Mécanisation, emploi d'engrais, mais également recours systématique à l'usage de phytosanitaires ont été des leviers pour répondre à cet enjeu et il est vrai que les préoccupations de durabilité des systèmes de production ne constituaient qu'un sujet de second plan.

Aujourd'hui l'impact sur l'environnement, la préservation de la biodiversité, les effets sur la santé humaine des molécules de produits phytosanitaires sont de mieux en mieux documentés et inquiètent non seulement les agriculteurs mais également l'ensemble de nos concitoyens.

Cette situation a conduit le Gouvernement à accélérer la prise de mesures d'interdiction ou de réduction des produits à usage phytosanitaire et à porter le débat auprès des instances européennes.

Au-delà de ces mesures réglementaires déterminées, nous avons la responsabilité d'accompagner l'évolution des pratiques, de proposer à nos agriculteurs des solutions de substitution et en particulier de nouvelles pratiques culturales qui mobilisent de façon intensive les connaissances agronomiques et limitent le recours à la « chimie ». C'est ainsi le rôle de la « task force » sur le glyphosate qui permet de rendre accessible et de partager avec le plus grand nombre les recommandations des experts et les solutions éprouvées sur le terrain par les agriculteurs eux-mêmes.

Plus largement, pour diminuer sensiblement l'usage des pesticides, le même couplage entre la recherche et le retour d'expérience est au cœur du programme Ecophyto 2+ porté par les ministères chargés de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche.

Dans ces deux exemples, la recherche et l'innovation sont des moteurs essentiels de l'évolution de nos pratiques agricoles. La production scientifique nationale et européenne est déjà très mobilisée. Au-delà des objectifs déjà ambitieux de réduction de l'usage des pesticides dans lesquels s'inscrivent ces programmes de recherche, il est nous est apparu nécessaire d'anticiper une mutation profonde de nos pratiques agricoles et de nos pratiques alimentaires, de promouvoir une approche agro-écologique plus saine et plus respectueuse de l'environnement et qui participe à la compétitivité de nos territoires.

C'est l'objectif du Programme prioritaire de recherche (PPR) que nous avons annoncé en juillet dernier et dont nous avons confié le pilotage scientifique à l'INRA. Inscrit dans le 3^e programme d'investissements d'avenir (PIA3) et doté de 30 M€, il a pour objectif d'identifier des voies alternatives à l'emploi des phytosanitaires en mobilisant les leviers de l'agroécologie, du biocontrôle et de la prophylaxie pour nous permettre de transformer les pratiques dans nos exploitations, de « cultiver et de protéger autrement » et de faire ainsi de notre pays le territoire pionnier d'une nouvelle agriculture européenne.

L'Inra vient de nous remettre un rapport d'étape qui synthétise la réflexion conduite par la communauté scientifique pour identifier les questions de recherche sur lesquelles il serait nécessaire d'investir et de donner une impulsion nouvelle.

Nous avons décidé de le rendre public. Ce rapport ne présente pas l'intégralité des échanges, très nombreux, qui ont accompagné la réflexion du groupe de scientifiques mobilisés. Il n'est pas assimilable à une expertise collective, démarche sur laquelle s'appuie de plus en plus souvent la décision publique. Ce n'est pas non plus une publication scientifique, soumise à une revue par les pairs, qui est le support classique de la production des chercheurs. Simple document de travail, il a pour objectif de faire partager la démarche, les interrogations qui ont conduit au choix des priorités scientifiques qu'il propose.

Il ne s'agit pas, à ce stade, d'un document de programmation scientifique qui engage l'Etat. C'est en revanche à partir de ces propositions qui seront discutées et précisées, que sera préparé l'appel à projets de recherche du PPR dont les premières actions seront lancées par l'Agence nationale de la recherche au cours du 1^{er} semestre 2019. Des initiatives mentionnées dans ce rapport pourront aussi être lancées en complément au PPR.

Entre la prise de décision initiale d'une action gouvernementale, ici en juillet 2018, et les premières concrétisations s'écoulent parfois plusieurs mois, délai qui suscite l'incompréhension ou l'impatience. Ce temps nécessaire de la réflexion est dense et vient s'ajouter au travail de scientifiques qui conduisent dans leurs laboratoires des projets de recherche, publient, communiquent et valorisent les résultats de leurs travaux.

La communication de ce rapport d'étape n'a pour ambition que de donner - en toute transparence - quelques indications sur cette approche systématique et collective qui est la marque de la démarche scientifique : analyse du contexte, définition d'une méthode, réalisation d'un état des lieux, identification des défis scientifiques, choix de priorités, discussion sur les voies et les moyens à adopter, création de synergies avec les acteurs de terrain, le monde économique, capacité à entraîner la communauté scientifique nationale et européenne. Il éclaire enfin sur cette constante de la recherche qui est probablement la moins visible dans les publications scientifiques, cette interrogation sur l'impact potentiel des recherches envisagées qui font de nos chercheurs des acteurs engagés dans la vie et l'évolution de notre société et de la recherche un investissement pour l'avenir.

Frédérique VIDAL
Ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de
l'innovation

Guillaume BOUDY
Secrétaire général pour l'investissement

SOMMAIRE

1. Contexte et ambitions du PPR	6
2. Méthode pour la construction du PPR.....	13
3. Etat de lieux des financements de recherche sur la thématique du PPR	13
4. Les défis scientifiques posés par l'objectif « zéro pesticides ».....	18
4.1 Connaître l'exposome chimique.....	18
4.2 Favoriser la transition des systèmes de culture pour renforcer la prophylaxie, réduire l'impact des bioagresseurs et l'utilisation des pesticides.....	23
4.3 Développer des espèces et variétés permettant la reconception des systèmes et la transition agro-écologique	35
4.4 Accélérer le développement de solutions de biocontrôle et leur déploiement par l'acquisition de connaissances nouvelles.....	43
4.5 Mobiliser l'agriculture numérique et les agroéquipements pour l'agroécologie et la réduction de l'usage des pesticides	51
4.6 Encourager le changement en mobilisant les leviers économiques et réglementaires, privés et publics.....	59
5. Priorités pour le PPR.....	68
5.1. Animation scientifique	69
5.1.1. Gouvernance générale.....	69
5.1.2. Prospective « Agriculture européenne sans pesticides ».....	70
5.1.3. Colloques internationaux et rencontres « terrain » autour des thématiques du PPR.....	71
5.1.4. Synthèses des connaissances.....	72
5.2 Appels à projets « fronts de science ».....	73
5.2.1. Couverts végétaux à forte diversité fonctionnelle, microbiome et résistances des plantes pour des systèmes de cultures sans pesticides.....	73
5.2.2. Conception innovante des systèmes de cultures, déploiement du biocontrôle et leviers socio-économiques de la transition.	75
5.3 Appels à projets « outils structurants »	77
5.3.1. Epidémiosurveillance pour la prophylaxie.....	78
5.3.2. Infrastructure dédiée à la caractérisation de l'exposome chimique.....	79
5.3.3. Recherches en articulation avec les dispositifs expérimentaux et d'innovation « zéro pesticides ».....	80
6. Dimension européenne et internationale	81
7. Calendrier, retombées et impacts <i>in itinere</i>	82
7.1 Livrables	82
7.2. Impacts du programme, évaluation en temps réel	84
8. Conclusion	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	86

INTRODUCTION

La réduction progressive de l'utilisation des pesticides est inscrite à l'agenda européen et national, à la fois en termes de politiques publiques agricoles que de programmation de recherche. Elle répond à une demande sociétale forte et vise à assurer une réelle durabilité économique, sociale et environnementale de l'agriculture.

Des travaux ambitieux de recherche et de recherche appliquée sont en cours pour réduire la dépendance de l'agriculture française en pesticides, soutenus par les politiques publiques nationales, en premier lieu le Plan Ecophyto. On sait à partir des connaissances scientifiques disponibles et des résultats obtenus dans les fermes et dispositifs expérimentaux DEPHY que des réductions de 20 ou 30 % sont possibles qui permettent de maintenir la production et le revenu des agriculteurs, avec des différences selon les orientations techniques des exploitations agricoles et selon le milieu. Parallèlement en Agriculture Biologique, on produit sans pesticides chimiques de synthèse, avec un différentiel de prix, lié au consentement à payer des consommateurs, qui permet de compenser la plus faible productivité par unité de surface. Les acquis des dispositifs de recherche-innovation en place devraient permettre de généraliser à une grande partie de l'agriculture française les résultats actuellement en voie de consolidation, sous réserve que les leviers socio-économiques pour accompagner la transition soient opérants.

Le programme de recherche que nous proposons ici se situe dans une perspective plus lointaine et ambitieuse, à l'horizon 2030-2040, avec l'objectif de produire des solutions permettant le déploiement d'une agriculture sans pesticides, ceci intégrant la disparition des produits de synthèse et les substances ayant un impact négatif significatif sur l'environnement. Cette agriculture doit être à la fois productive et rémunératrice pour les agriculteurs. Cette ambition va donc bien au-delà des enjeux sous-jacents à la plupart des projets de recherche et recherche appliquée conduits à ce jour et conduit à explorer des champs de recherche inédits. Se fixer un tel cap permet de développer dès aujourd'hui des connaissances pour avoir demain les solutions permettant de répondre à la demande de la société d'une agriculture sans pesticides. Il oblige à un changement de regard pour promouvoir une avancée sur des fronts de science porteurs mais inédits ou insuffisamment explorés et une évolution des disciplines scientifiques intégrant les nouveaux enjeux et les avancées des autres disciplines. En même temps que la mobilisation de fronts de science au sein de chacune des disciplines, les approches multidisciplinaires sont indispensables, croisant les disciplines biologiques et agronomiques, physiques et celles relevant des sciences humaines et sociales. Il est également nécessaire de doter notre pays d'outils structurants pour éclairer certaines dimensions du changement qui va s'opérer.

En favorisant l'exploration de fronts de recherche ambitieux et en créant des outils structurants originaux, ce programme prioritaire de recherche vise à créer les conditions d'un véritable leadership des équipes de recherche françaises dans le concert européen et international. Il crée aussi les conditions de nouveaux partenariats avec les entreprises les plus avancées des secteurs d'activités concernés.

1. Contexte et ambitions du PPR

1.1. Contexte

La France est le premier utilisateur de produits pesticides en Europe, et le 4^{ème} au niveau mondial. Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, où l'augmentation de la production était la cible principale de l'agriculture, les pesticides ont d'abord permis, en combinaison avec les fertilisants de synthèse, de contrôler certains facteurs limitants du rendement, et ainsi, d'atteindre régulièrement une production élevée. Puis, la disponibilité accrue et la maîtrise croissante des intrants ont accompagné une simplification des systèmes de culture autour d'un petit nombre de cultures rentables, une séparation des productions animales et végétales, et une évolution des conduites de culture, dans l'objectif d'une productivité toujours plus élevée. Le raccourcissement des rotations et l'évolution des systèmes de culture ont alors conduit à un accroissement continu de l'usage des pesticides. Aujourd'hui, les pesticides sont devenus le pivot des systèmes de production (Meynard et Girardin, 1991 ; Guichard et al, 2017 ; Tilman et al., 2002). A l'échelle Française, le NODU¹, indicateur du plan Ecophyto, augmente régulièrement depuis 2008 : +12% entre 2009 et 2016 (moyennes triennales), avec une augmentation qui porte surtout sur les herbicides, les NODU fongicides et insecticides étant relativement stables sur la période (Ecophyto 2018).

Si une réduction de 30% de l'usage des pesticides, sans réduire les volumes de production, est possible en intégrant, dans les itinéraires techniques des cultures, les principes de la protection intégrée, une réduction plus ambitieuse nécessite de reconcevoir en profondeur les systèmes de culture (Jacquet et al, 2011 ; Lechenet et al, 2017). Pour viser des réductions fortes de l'usage des pesticides, tout en maintenant les marges économiques des agriculteurs et des prix accessibles pour les consommateurs, de nouveaux cadres sont donc à poser et de nouveaux fronts de connaissances sont à ouvrir.

Les pesticides ont permis par le passé des bénéfices privés pour le secteur agricole (augmentation de la production, diminution des coûts de production, diminution des risques économiques sur la production), se répercutant aux consommateurs par des baisses de prix des produits, qui ont pu consacrer dès lors une part de plus en plus faible de leurs revenus à l'alimentation. Cependant, les pesticides génèrent des dommages pour la santé et l'environnement, qui rendent impératif aujourd'hui de développer des alternatives aux pesticides. Au cours du temps, divers facteurs ont contribué à un auto-renforcement de la supériorité économique des pesticides par rapport à leurs alternatives (Cowan et Gunby, 1996; Wilson et Tisdell, 2001; Vanloqueren et Baret, 2008) : compatibilité avec les changements de capital fixe, effets de réseau, effets de dépendance au sentier dans les possibilités d'innovation (David, 1985), tendance au *statu quo* des politiques publiques et prise en compte insuffisante des effets négatifs des pesticides sur la santé et environnement.

Les dommages des pesticides pour la santé et l'environnement, parfois appelés « coûts cachés » des pesticides, concernent l'ensemble de la société (effets sur la santé des riverains de l'agriculture par la pollution de l'air, ou sur la santé de la population générale

¹ Nombre de Doses Unités, voir la définition dans: <http://www.ecophytopic.fr/tr/principes-et-definitions/textes-français/indicateurs>

à cause des résidus de pesticides dans l'alimentation ou dans l'eau), mais aussi et surtout le secteur agricole et ses travailleurs en particulier. Les expositions aux pesticides, en premier lieu par voie cutanée, peuvent affecter directement la santé des travailleurs agricoles et du secteur de la fabrication de pesticides. Il en résulte des coûts pour la santé de ces travailleurs qui sont à la fois privés et publics et qui appellent à des réglementations en termes de prévention et d'information. Les pesticides peuvent également diminuer les services rendus par les écosystèmes pour la production agricole (pollinisation, contrôle biologique des bioagresseurs, fertilité des sols par exemple).

1.2 Ambition du PPR

Dans le cadre de ce PPR, nous proposons de définir une cible ambitieuse, qui imposera de mettre en œuvre des techniques nouvelles et qui supposera des évolutions des systèmes agricoles et alimentaires et de l'organisation du système de R&D agricole : **des systèmes conduits sans pesticides**. Cette expression « pesticides » intègre les **pesticides de synthèse** et les **pesticides naturels ayant un impact négatif significatif sur l'environnement**. Dans cette perspective, les seuls pesticides autorisés seraient ceux bénéficiant d'un NODU vert². En cas d'infestation imprévue et non contrôlable, on accepterait, seulement en dernier recours, d'appliquer un de ces pesticides.

Cet objectif ambitieux impose de mobiliser et d'inventer tous les moyens susceptibles de réduire les risques d'occurrence de bioagresseurs et d'épidémie. Cette cible de recherche semble incontournable pour concevoir les modes de culture qui maximiseront les chances de réduire de manière très significative l'usage des pesticides. Se donner un tel objectif ambitieux oblige à explorer et exploiter toutes les synergies entre compartiments des écosystèmes et entre techniques, en accordant une attention particulière à leur stabilité selon les conditions environnementales. S'il existe aujourd'hui quelques essais visant, en conventionnel, une suppression totale des pesticides, la quasi-totalité des projets de R&D réalisés jusqu'à présent ont seulement privilégié un objectif de réduction, plus ou moins importante, de leur usage. Cette ambition de sortir des pesticides constitue donc un vrai défi.

Parmi les différentes approches à considérer pour réduire de façon conséquente l'usage des pesticides de synthèse, voire de s'en affranchir, celles visant une réduction des risques « en amont », avant l'arrivée des bioagresseurs, ou de façon à les limiter à un niveau n'ayant pas d'impact sur la production, doivent être privilégiées car, même si elles sont plus difficiles à mettre en œuvre que des techniques de substitution, elles auront un effet plus fort sur la réduction des bioagresseurs et donc de leurs impacts, à l'échelle du système de culture.

L'agriculture biologique (AB) exclut les pesticides de synthèse et a un IFT (Indice de Fréquence de Traitement) faible résultant de l'utilisation de pesticides naturels. Des ressources et une expérience importante existent donc au niveau de systèmes en AB, qui reposent sur des principes de prévention, et donc la mobilisation large de méthodes prophylactiques et la reconception des systèmes. Les enseignements de cette agriculture

² Le NODU correspond à un nombre de traitements « moyens » appliqués annuellement sur l'ensemble des cultures, à l'échelle nationale. Le NODU « Vert Biocontrôle » permet de suivre le recours aux produits de biocontrôle soumis à autorisation, notamment utilisés en agriculture Biologique mais également en agriculture conventionnelle ou en zones non agricoles (ZNA) et ne contenant pas de substance active classée dangereuse. Les macro-organismes (par exemple les coccinelles) ne sont pas comptabilisés dans le NODU Vert Biocontrôle car leur vente n'est pas soumise à déclaration.

sous signe de qualité pourront être mobilisés pour aider à la sortie des pesticides dans les systèmes conventionnels. Cependant, sur certaines cultures, l'AB utilise du sulfate de cuivre, d'origine naturelle mais ayant un impact significatif sur les milieux (Andrivot et al, 2018). Les connaissances produites et les options explorées dans le futur PPR pourront donc aussi trouver un champ d'application en agriculture biologique, pour aider à la sortie de l'utilisation du cuivre. La possibilité, dans les systèmes conventionnels, d'utiliser des engrais de synthèse, permet d'atteindre, dans certaines conditions, même sans pesticides, une productivité plus élevée que celle des systèmes en AB, comme on peut le voir sur des associations plurispécifiques (Pelzer et al., 2014) ou dans une synthèse d'expérimentations systèmes (Hossard et al., 2016). En contrepartie, utiliser de l'engrais minéral accroît les risques de certains bioagresseurs (maladies et adventices notamment), requiert des modalités d'utilisation adaptées pour éviter les impacts environnementaux négatifs (pollution de l'air, de l'eau et des sols, émission de gaz à effet de serre et consommation d'énergie fossile) et peut entraîner une réduction de la qualité nutritionnelle des produits. C'est donc un usage raisonné de cet intrant, et surtout une réflexion sur la complexification des couverts et des systèmes de production qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre pour atteindre de nouveaux équilibres entre réduction de la pression des bioagresseurs et augmentation de la productivité.

Les performances des systèmes de production sans pesticides sont sensibles aux conditions environnementales, puisqu'ils cherchent à exploiter toutes les spécificités des lieux de production. De ce fait, le passage à grande échelle de systèmes de production exemplaires, performants économiquement et sans pesticides nécessite une reconception adaptée localement. Ils nécessitent également des systèmes alimentaires en rupture par rapport aux systèmes actuels, depuis la production jusqu'à l'utilisation des produits de récolte et aux modes de consommation alimentaire.

Construire les solutions de demain ne peut pas se faire sans intégrer le changement du climat. En effet, le changement climatique va modifier la phénologie des cultures et potentiellement favoriser l'émergence de nouveaux bioagresseurs. Il faut donc pouvoir anticiper ces changements. La première incidence du changement climatique est une augmentation des variations interannuelles. Il convient dès lors de s'interroger sur les plus-values que des systèmes diversifiés (à l'échelle de la rotation, de la parcelle, de l'exploitation agricole, du paysage) développés pour une agriculture sans pesticides pourront apporter à la robustesse des systèmes de production et des exploitations face aux aléas climatiques accrus, et à leurs impacts économiques. Cette diversification des systèmes s'applique autant à des systèmes assolés que pérennes, tempérés et tropicaux. L'analyse de l'adéquation des voies explorées dans le PPR aux enjeux du changement climatique constituera aussi un indicateur de sa pertinence.

Il faudra également analyser les incidences des connaissances et innovations issues de ce PPR sur la biodiversité, dont il a été démontré, sur la base des populations d'insectes, pollinisateurs, oiseaux, flore, biodiversité du sol ou aquatique notamment, qu'elle était lourdement impactée par l'évolution des systèmes agricoles, dont les pesticides sont une des composantes (voir par exemple Deguines et al., 2014, Hallmann et al, 2017, Jeliaskov et al, 2016, Stehle et Schulz, 2015, Storkey et al, 2012, Tsiafouli et al, 2015).

Ainsi, une ambition de sortie des pesticides est posée pour ce programme de recherche prioritairement tourné vers la production de connaissances originales car elle permet de se donner un horizon à long terme conduisant à devoir explorer tous les fronts de connaissances et toutes les reconceptions possibles.

Par ailleurs, le programme propose également de mener des recherches sur les leviers de transition vers le zéro pesticides. Ainsi, il pourra alimenter les transitions des systèmes actuels, en fournissant des clés de compréhension et des clés d'action sur certains leviers. Ceci pourra être assuré de façon efficace par l'articulation et le dialogue entre le présent PPR et les autres programmes de recherche et recherche appliquée mis en œuvre en vue de réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, et notamment les possibilités offertes par le plan Ecophyto 2+.

1.3 Les principes d'action

Trois grands principes d'action permettent de structurer la démarche : prophylaxie, agroécologie et chaîne de valeur.

Prophylaxie

La protection des cultures telle que pratiquée aujourd'hui en France et dans le monde repose massivement sur les approches curatives, avec des produits de protection des cultures efficaces, appliqués à des doses homologuées, soit quand le bioagresseur (adventices, champignons pathogènes, insectes, ...) est visible, soit en application systématique, qualifiée parfois de préventive. Ainsi on ne tient pas compte de la pression effective, car l'efficacité des produits utilisés est suffisante quelle que soit la pression. La seule limitation est l'émergence de résistance parmi les bioagresseurs ciblés, ce qui se produit de façon fréquente quand une même molécule est utilisée à grandes échelles et que de nombreuses mutations du bioagresseur peuvent engendrer l'apparition d'une résistance, puis son expansion, comme c'est le cas notamment pour les adventices et la résistance aux herbicides de la classe des sulfonilurées (Tranel et Wright 2002).

Cette approche conduit à ne pas chercher à réduire la pression des bioagresseurs en mobilisant des **méthodes prophylactiques** adaptées. Il est indispensable d'inverser l'approche en promouvant d'abord la prophylaxie. Plusieurs principes prophylactiques, à la base de la protection intégrée des cultures (Altieri et al., 1983 ; Dent, 1995 ; Flint et Gouveia, 2001 ; Meynard et al., 2003), sont d'ores et déjà connus : diversifier les rotations, couvrir les sols tout au long de l'année, cultiver des variétés résistantes aux maladies et compétitives vis-à-vis des mauvaises herbes (voire à caractère répulsif pour certains insectes), récolter les menues pailles, collecter ou enfouir les feuilles porteuses de spores. Ces grands principes prophylactiques ne sont aujourd'hui connus et maîtrisés que sur un petit nombre d'espèces ou de systèmes de production, ou étudiés de façon segmentée.

Outre les méthodes nécessaires, il est également nécessaire de disposer de métriques adaptées, permettant de préciser la réalité et la variation de la pression des bioagresseurs, en particulier comme résultats des méthodes prophylactiques qui pourront être déployées, depuis la parcelle agricole jusqu'au territoire. En effet, de telles métriques permettraient un réel pilotage de la prophylaxie par les agriculteurs et pourraient permettre de déployer des systèmes incitatifs pour les agriculteurs ayant des pratiques prophylactiques.

Agroécologie

L'Agroécologie est un cadre d'analyse particulièrement riche pour comprendre le fonctionnement des couverts végétaux et des territoires agricoles. Ce terme est polysémique puisqu'il est à la fois une discipline scientifique, un ensemble de pratiques et un mouvement social (Wezel et al, 2009). Les différentes acceptions du terme ont en commun de rechercher l'augmentation de la diversité fonctionnelle pour augmenter les régulations biologiques et les services écosystémiques (Millenium Ecosystem

Assessment, 2005). La diversité fonctionnelle concerne les traits fonctionnels, traits d'effet et traits d'impact (McGill et al, 2006). Cette augmentation doit être considérée à différentes échelles spatiales, depuis la plante et la parcelle agricole jusqu'au paysage, et à différentes échelles de temps. Ainsi, le choix du microbiote, la diversification à l'échelle de la succession culturale, et l'intégration des cultures de rente avec les cultures intermédiaires ou les espaces enherbés peuvent contribuer à l'augmentation de la diversité fonctionnelle. Dans cette vision de l'agroécologie, outre le couvert végétal, il faut prendre en compte le sol et son fonctionnement qui sont sources de régulations biologiques, à la fois pour lutter contre les bioagresseurs telluriques, limiter les adventices, mais aussi augmenter la nutrition des plantes.

L'agroécologie permet également de considérer d'un œil nouveau les leviers du biocontrôle, non pas dans une approche de substitution aux pesticides, mais comme un levier d'augmentation de la diversité fonctionnelle, avec en résultats les régulations biologiques et la limitation des bioagresseurs. Ceci peut même conduire à s'interroger sur les interactions entre classes de bioagresseurs. Ainsi, Muneret et al (2018) questionnent le rôle positif possible de la présence des adventices en agriculture biologique comme facteur explicatif de la plus faible pression des champignons pathogènes.

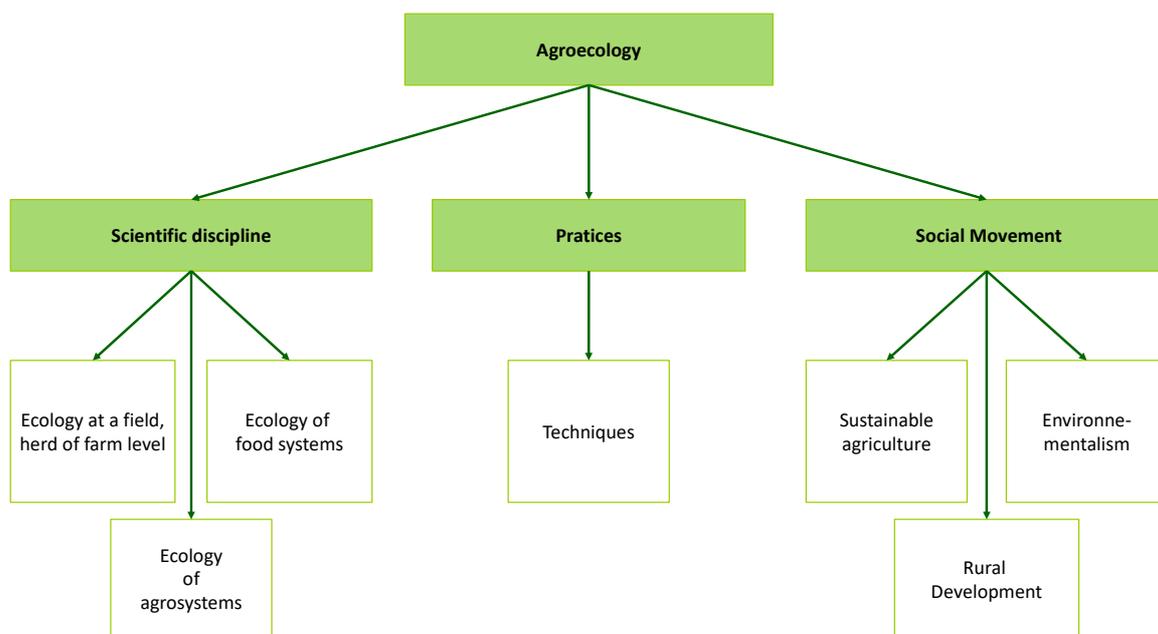


Figure 1 : Les différentes acceptions du terme Agroécologie (d'après Wezel et al, 2009)

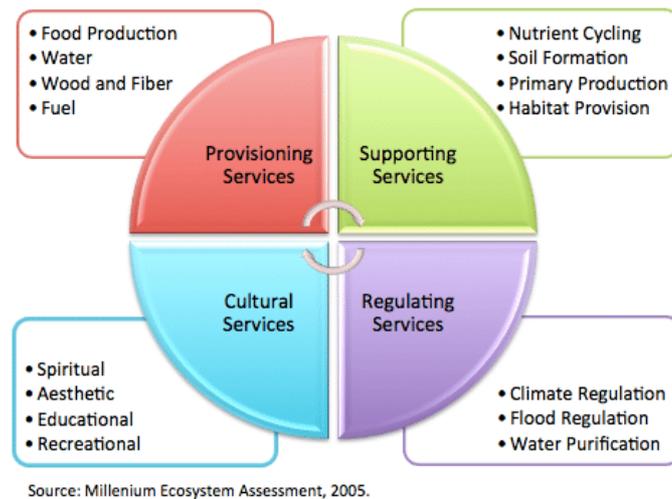


Figure 2 : Les services écosystémiques (MEA, 2005)

La mobilisation de l'agroécologie et la recherche d'une augmentation de la diversité fonctionnelle conduisent à l'augmentation de la complexité dans les systèmes cultivés. Ceci est diamétralement opposé à l'évolution connue au cours des cinq dernières décennies où la recherche de performances économiques dans les filières agricoles s'est traduite par la recherche d'économies d'échelle, traduite en une simplification des systèmes de cultures : réduction du nombre d'espèces cultivées, augmentation de la taille des parcelles et réduction des éléments fixes du paysage, etc.

L'augmentation de la diversité fonctionnelle passe notamment par :

- la diversification des espèces cultivées,
- la complexité des couverts, où les mélanges de variétés et d'espèces deviendront la règle,
- la mise en place systématique de couverts végétaux. Les couverts intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) avaient un statut de correction d'un impact de la culture précédente. Cette situation sera remplacée par des couverts intermédiaires multi-services (Justes et Richard, 2017), par des cultures compagnes (Lorin et al, 2015), et par la mise en place de mulchs vivants (Jézéquel et al, 2018 ; Labreuche et al, 2017),
- des modes de couverture du sol plus hétérogènes, avec la combinaison de cultures herbacées et d'une strate arbustive ou arborée, dont une des modalités est l'agroforesterie (Artru et al, 2017),
- l'utilisation d'une diversité d'espèces auxiliaires macro- ou micro-organismes,
- une évolution des agroéquipements, à la fois pour l'implantation, la gestion et la récolte des cultures conduites en mélange, mais aussi pour la gestion post-récolte.

Ceci conduit aussi à rechercher une augmentation du Land Equivalent Ratio (LER)³ au-delà de la valeur de 1, valeur de référence pour une culture pure (Hamzel et Seyedi, 2015,

³ défini comme la surface relative nécessaire en cultures pures pour avoir la même production que les cultures associées

Justes et al, 2014), dont on attend un effet sur la performance économique du système de production. Cependant, la simplification liée à l'intensification a eu par le passé l'avantage de réduire la charge de travail et la charge mentale de l'agriculteur. Il faut considérer le fait que la complexification puisse être un frein au changement. La formation, le conseil et l'accompagnement de la transition devront prendre explicitement en charge ces questions, tandis que les solutions issues du numérique et de l'agroéquipement devront permettre d'accompagner et de faciliter le changement.

Mobiliser la chaîne de valeur pour des systèmes alimentaires sans pesticides

L'évolution vers des productions plus diverses implique la mise en place de nouvelles filières de transformation et de commercialisation, la présence de couverts plus complexes peut engendrer une hétérogénéisation des productions, même si elle n'est pas inévitable (cf mélanges de variétés de blé tendre pour réduire la variation entre lots), la valorisation de la production sans pesticides passe par une identification et une reconnaissance par le consommateur des caractéristiques du produit. Cette évolution devra donc nécessairement mobiliser les différents acteurs des filières agroalimentaires. Ainsi au-delà du stade de la production agricole, c'est à une reconception du système alimentaire dans son ensemble qu'appelle cette agriculture sans pesticides. Elle doit être traitée conjointement par l'amont, la production, la collecte, la transformation, la distribution et les consommateurs, à la fois pour assurer les intrants et la logistique nécessaires à ces productions nouvelles, pour mobiliser cette matière première et engendrer de la valeur ajoutée.

Les outils du numérique peuvent jouer un rôle important pour permettre la traçabilité de la production, et la capacité à documenter en temps réel les qualités de la matière première. Les politiques publiques, y compris les signes officiels de qualité, mais aussi les cahiers des charges privés constituent des leviers pour permettre cette transition. Des dispositifs réglementaires bénéficiant d'une évaluation indépendante, comme les CEPP (Certificats d'Economie de Produits Phytopharmaceutiques) sous réserve qu'ils couvrent la totalité des produits et qu'ils permettent de favoriser les mises en système peuvent servir de véritables référentiels pour les agriculteurs mais aussi pour l'ensemble des chaînes de valeur.

Ainsi, pour réussir l'évolution du système agricole et alimentaire, cette reconception doit reposer sur une mobilisation concertée des agriculteurs, des entreprises d'amont et d'aval, de la R&D agricole, des pouvoirs publics, et des consommateurs. La demande de produits à bas prix et d'apparence extérieure irréprochable n'est en effet guère compatible avec l'exigence de réduction des pesticides. Concevoir des systèmes diversifiés passe aussi par l'évolution des régimes alimentaires et la prise en compte des caractéristiques nutritionnelles de l'alimentation. Ainsi, par exemple, concevoir des systèmes avec plus de légumineuses alimentaires nécessite une évolution des modes de consommation avec des régimes alimentaires intégrant mieux ces cultures (Magrini et al., 2018). Repenser les systèmes de culture pour répondre aux défis de demain nécessite d'agir de manière systémique, et de changer de critères de performance pour évaluer les systèmes agri-alimentaires. Étant donné les liens forts qui existent entre ces différents maillons de la chaîne alimentaire, et le besoin immense d'innovations pour atteindre la cible ambitieuse du zéro pesticide, c'est une véritable reconception du système alimentaire qu'il faut entreprendre (Tilman et Clark, 2015).

2. Méthode de construction du projet scientifique du PPR

Le projet scientifique présenté dans ce document repose, à partir d'un cadre initial proposé par le MESRI, sur une réflexion conduite d'octobre à décembre 2018 par un comité d'animation composé de 19 personnes d'origines institutionnelles diverses : des scientifiques (INRA, Universités et Etablissements d'enseignement supérieur agronomique, CNRS, INRIA, IRSTEA) et des professionnels (ACTA, UFS, Agrauxine, ITAB), sous la coordination de Florence Jacquet et de Christian Huyghe. Des experts extérieurs au comité ont également été consultés et la réflexion s'est nourrie d'interactions avec différentes instances de réflexion et d'action concernées par le sujet des pesticides.

Le travail de construction collective a été organisé de deux manières, d'une part par une réflexion approfondie en petits groupes autour d'objectifs appelés « défis » et identifiés comme les leviers permettant la transition visée et d'autre part par des discussions au sein du comité dans son ensemble sur les transversalités et interactions entre ces défis pour dégager les priorités de recherche.

Les six défis qui ont structuré la discussion sont les suivants :

- Connaître l'exposome chimique
- Favoriser la transition des systèmes de culture pour renforcer la prophylaxie, réduire l'impact des bioagresseurs et l'utilisation des pesticides
- Développer des espèces et variétés permettant la reconception des systèmes et la transition agro-écologique
- Accélérer le développement de solutions de biocontrôle et leur déploiement par l'acquisition de connaissances nouvelles
- Mobiliser l'agriculture numérique et les agroéquipements pour l'agroécologie et la réduction de l'usage des pesticides
- Encourager le changement en mobilisant les leviers économiques et réglementaires, privés et publics.

Le comité s'est réuni à quatre reprises, le 1^{er} octobre, 6 novembre, 28 novembre 2018 et 9 janvier 2019.

La réflexion a été appuyée également par une analyse des projets de recherche financés ces dix dernières années sur les thématiques du futur PPR, à la fois au niveau national (par l'ANR, Ecophyto et le CASDAR) et au niveau européen (FP7 et H2020)

3. Etat de lieux des financements de recherche sur les thématiques du PPR

De nombreux dispositifs de financement de la recherche existent déjà qui soutiennent des projets de recherche en lien avec les thématiques du futur PPR.

Au niveau national, l'ANR a financé depuis 2008, 148 projets⁴ en lien plus ou moins étroit avec les défis du PPR, pour un budget total de 66 millions d'euros. Ces projets ont été financés jusqu'en 2013 dans le cadre des appels à projets thématiques (Systemerra,

⁴ Recherche sur la base de données ANR accessible en ligne par mots clefs: pesticides, herbicides, fongicides, insecticides, agro-écologie, résistance des plantes, biocontrôle, lutte biologique

Agrobiosphere, CESA, etc.) et dans le cadre des appels à projets BLANC , puis à partir de 2014 dans le cadre de l'Appel à Projets Générique et d'appels internationaux. Il s'agit le plus souvent de projets visant à produire des connaissances fondamentales mais aussi de projets ciblés et finalisés sur la résolution de problèmes et de projets en partenariat avec des entreprises.

Le Plan Ecophyto, via son axe Recherche, a financé depuis 2010, 158 projets directement liés à l'objectif de réduction des usages des pesticides, pour un montant total de 21 millions d'euros sur des appels dédiés ou en cofinancement d'appels lancés par d'autres organismes : ANSES, Ministère de l'écologie, etc. Ce sont des projets de recherche finalisés dont les thématiques répondent aux priorités définies dans Programme scientifique Recherche et Innovation du plan Ecophyto I puis dans la Stratégie Recherche et Innovation du plan Ecophyto II . Le budget Ecophyto Recherche a été en moyenne de 2,6 millions par an sur la période 2010-2017.

Par ailleurs, le programme Ecophyto a recensé (données accessibles en ligne) les projets financés dans le cadre des appels à projet du Compte d'Affectation Spéciale du «Développement Agricole et Rural » (CASDAR) sur les thématiques en lien avec le Plan Ecophyto, et on dénombre au total 84 projets depuis 2010 pour un budget total de 23 millions d'euros.

A ces financements, il conviendrait d'ajouter pour l'Innovation et la Recherche-Développement, les financements attribués par le Programme des Investissements d'Avenir (PIA) avec des montants importants consacrés à des projets de sélection variétale et au secteur du biocontrôle, ainsi que les financements attribués par le Fonds Unique Interministeriel (FUI) aux projets d'innovations, et les financements du Crédit Impôt Recherche (CIR) .

Au niveau européen, en lien avec les thématiques du futur PPR, on a pu identifier dans le FP7 et H2020 (soit entre 2008 et 2018) 125 projets de recherche⁵ avec participation d'équipes françaises, pour un budget total de 64 millions attribués à ces équipes. Ce montant concerne tous les instruments du FP7 (projets collaboratifs, partenariat PME, bourses individuelles, etc.) et de H2020. Dans H2020, on note l'importance des projets qui s'inscrivent dans le Programme Européen d'Innovation Agriculture (PEI-Agri) sous la forme de projets de type « multi-actor approach » incitant à une participation d'acteurs non-académiques (entreprises, agriculteurs,...)

Finalement, ce sont environ une cinquantaine de projets par an pour 15 millions d'euros environ qui ont depuis 10 ans produit des connaissances mobilisables.

⁵ Recherche sur la base de données CORDIS par mots clefs : pesticide, herbicide, fongicide, insecticide, biocontrol, agroecology, agricultural transition, plant resistance

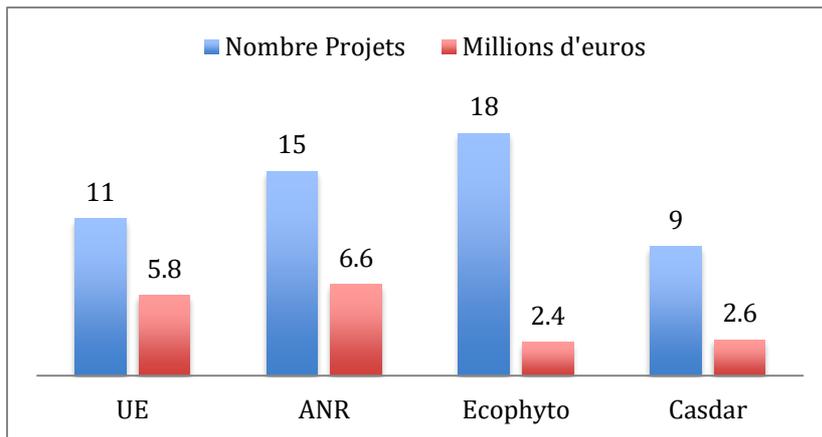


Figure 3 : Nombre de projets et montant des financements en moyenne annuelle

On peut distinguer dans cet ensemble, des projets plus orientés sur la production de connaissances et des projets visant la production d'innovation ou le développement, portés en partenariat avec des entreprises ou des organismes de Recherche-Développement. Dans la perspective d'appuyer la réflexion pour construire le PPR, les projets recensés ont été classés en 6 catégories correspondant aux thématiques retenues pour la réflexion :

1/1bis : Impacts des pesticides sur la santé et l'environnement

2 : Leviers agronomiques pour la réduction des pesticides

3 : Mécanismes de résistance ou tolérance des plantes aux bioagresseurs

4 : Connaissances pour le biocontrôle

5 : Capteurs/agroéquipements/épidémiosurveillance

6 : Analyses des dimensions sociologique, économiques, juridiques et politiques de l'usage et de la réduction de l'usage des pesticides.

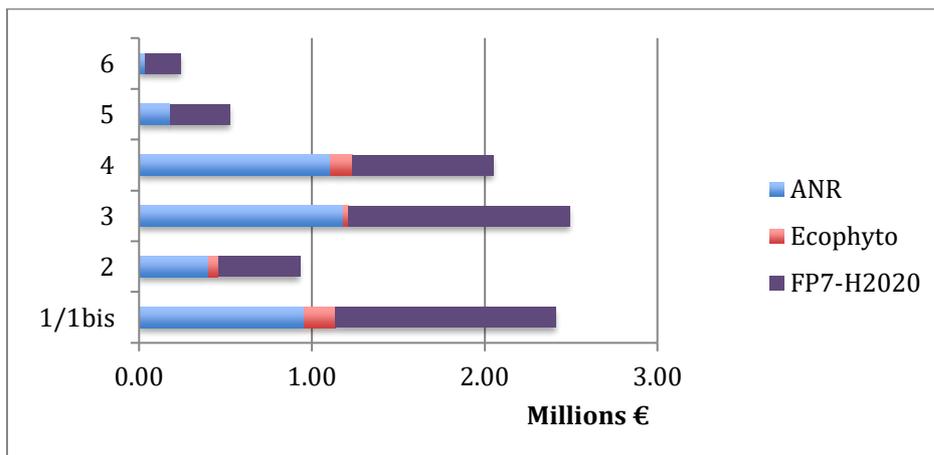


Figure 4 : Montant des financements annuels par thème pour projets recherche « production de connaissances fondamentales »

Dans le premier ensemble illustré par la figure 4 on voit l'importance des thématiques 3, 4 et 1. Pour l'ANR, cela concerne des projets qui ont porté sur : i) les mécanismes au niveau cellulaire des relations hôte/pathogène et les déterminismes de la résistance aux pathogènes des végétaux (thème 3) , ii) les mécanismes d'infection mis en œuvre par les espèces nuisibles pour détourner le métabolisme des plantes, et plus généralement les comportements des bio-agresseurs (thème 4) et iii) les impacts et risques sur la santé (thème 1) et l'environnement (thème 1bis), avec environ 40% de ces projets sur la santé humaine, principalement dans le cadre d'études épidémiologiques à partir de cohortes sur l'impact de différents contaminants, dont les pesticides .

Au niveau Européen, les projets de recherche sont souvent plus intégrés, c'est à dire combinant, dans une visée de constructions de connaissances complémentaires sur une plante ou un système de culture, des travaux en génétique, agronomie et lutte biologique, destinés à permettre une réduction de l'usage des pesticides. Les projets se référant à la Protection Intégrée des Cultures sont ainsi très importants dans les financements européens, surtout dans le FP7, la participation de chaque équipe nationale pouvant porter sur une seule dimension du problème.

Dans le second ensemble de projets (figure 5) on trouve des projets ANR, notamment des projets en partenariat industriel (TRL 5-7). Ainsi le programme « Labcom » (pour Laboratoires Communs) dont l'objectif est le soutien à des partenariats public-privé durables dans le cadre de recherches dont les résultats doivent être rapidement valorisables, a financé 3 projets sur la période 2014-2017, sur des thèmes relatifs au biocontrôle. En 2017, l'ANR a lancé, en cofinancement avec le Plan Ecophyto, le challenge ROSE « Robotique et capteurs au service d'Ecophyto » pour un montant total de 2,5 millions d'euros (thème 5). Dans cet ensemble de projets, on trouve aussi des projets visant à concevoir des systèmes agronomiques permettant la réduction de pesticides (thème 2) souvent en partenariat avec des organismes de recherche-développement (instituts techniques agricoles), économiques (coopératives, entreprises) ou professionnels (chambres d'agriculture). Sur le thème 3, il faut rajouter aux chiffres présentés dans la figure 3 les projets soutenus dans le cadre du programme « biotechnologies-bioressources » du PIA qui de 2011 à 2017 a financé pour un montant total de 40 millions € plusieurs projets sur la sélection de nouvelles variétés de plantes cultivées aux performances améliorées dans une perspective d'agriculture durable (betterave, maïs, blé, pois, colza et tournesol). Si la résistance aux maladies des plantes n'a pas souvent été prioritaire dans ces projets, elle a été abordée et par ailleurs, les ressources génétiques qu'ils ont permis de créer constituent un levier pour la suite.

Au niveau européen, le Partenariat européen pour l'innovation (PEI) « pour une agriculture productive et durable » (PEI-Agri) est une initiative communautaire qui vise à combler le déficit d'innovation en incitant la constitution de partenariats multi-acteurs pour faciliter les échanges de connaissances et la prise en compte des connaissances issues de la pratique. Les projets du PEI peuvent bénéficier de différentes sources de financement, dont notamment le FEDER et Horizon 2020. Sur les thématiques qui nous intéressent, environ la moitié des projets financés dans le cadre de H2020 le sont dans ce dispositif. Ils concernent par exemple des projets de sélection participative (thème 3), de conceptions avec les acteurs de systèmes de culture innovants (thème 2), de mises au point de techniques de lutte biologique (thème 4) ou d'évolution du conseil aux agriculteurs dans la transition agro-écologique (thème 6)

Les dispositifs Ecophyto et CASDAR ont également financé un grand nombre de projets (en particulier sur les thèmes 2 et 4) pour lesquels les acteurs de la recherche-développement sont en association avec la recherche publique et qui visent à l'élaboration de connaissances et de solutions permettant de réduire l'usage des pesticides.

L'ensemble de ces projets produit une masse considérable de connaissances sur les leviers pour la réduction de pesticides dans les systèmes actuels, mais finalement on observe que peu d'entre eux s'attaquent à la reconception plus globale des systèmes dans une perspective de sortie des pesticides.

Enfin, les réseaux Ferme-DEPHY et Expe-DEPHY du Plan Ecophyto sont également des lieux de mobilisation et de créations de connaissances très importants sur la problématique de réduction/sortie des pesticides. Les 13 projets d'expérimentation Expe-DEPHY sélectionnés en 2017 sont en particulier beaucoup plus orientés que les précédents sur des systèmes sans pesticides ou sur des objectifs de réduction de plus de 50% de l'usage des pesticides, et il y a sans aucun doute des liens à construire entre ces dispositifs et les actions du PPR.

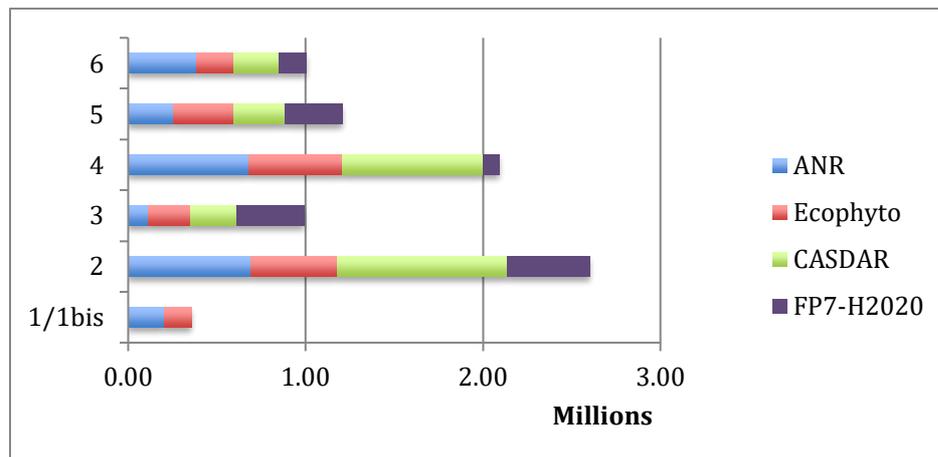


Figure 5 : Montants des financements annuels pour projets de recherche-développement-innovation

En conclusion de cette analyse, on peut constater qu'il y a un nombre conséquent de projets de recherche fondamentale et de recherche appliquée sur le sujet des pesticides et de la réduction de leur utilisation et ceci sur les différents champs que le PPR ambitionne de couvrir. Les montants des aides financières publiques sont très significatifs.

L'analyse des projets au travers de leurs résumés montre que ces projets sont soit des études descriptives de l'effet des pesticides ou de l'effet de certains leviers, soit ils visent à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires. Mais force est de constater qu'à quelques exceptions près, ils ne s'inscrivent pas dans une perspective de sortie des pesticides.

Ayant positionné l'ambition du projet de PPR dans cette perspective de sortie des pesticides, ceci permet d'envisager la mobilisation de leviers originaux, seuls ou en combinaison, et ceci exige l'exploration de questions de recherche nouvelles.

4. Les défis scientifiques posés par l'objectif « zéro pesticides »

Les textes présentés dans cette partie sont issus du travail du comité d'animation, avec l'objectif d'identifier, pour chacun : l'ambition du défi, l'état des lieux des connaissances et des dispositifs de financement de la recherche existants (en utilisant notamment le recensement des projets présenté dans la partie précédente), les thématiques à approfondir et des suggestions sur les modalités d'actions à lancer. Ils sont de ce fait porteurs d'idées pour le PPR et au-delà.

Chaque partie a été rédigée par trois ou quatre membres du comité et a bénéficié des interactions avec les autres membres et avec des personnes extérieures.

4.1 Connaître l'exposome chimique

Jean-Pierre CRAVEDI, Robert BAROUKI, Chris ROTH

1. Ambition

En santé environnementale, disposer de connaissances précises sur l'exposition est un préalable indispensable à la compréhension du lien de causalité entre les contaminants et les dommages à la santé. C'est aussi une composante essentielle de l'évaluation du risque en santé-travail ou en sécurité sanitaire des aliments.

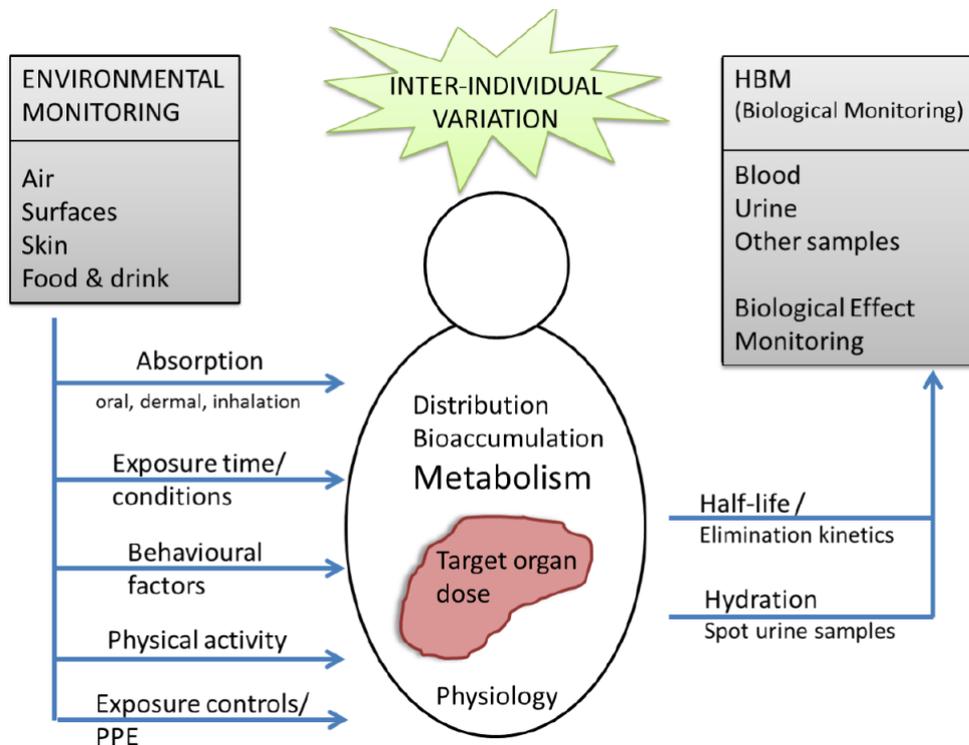


Figure 6 Principaux compartiments et approches pris en compte dans l'exposome chimique. PPE = équipement de protection personnelle. (D'après Brevan et al., 2017, EFSA; <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1185>)

Caractériser l'exposition à des substances chimiques telles que les pesticides relève de plusieurs démarches complémentaires (figure 6). La première approche consiste à évaluer le niveau de contamination de l'environnement et de l'alimentation par ces substances et d'en estimer la contamination de l'homme en les croisant à données d'inhalation ou de consommation alimentaire, en tenant compte de paramètres toxicocinétiques. S'agissant de la population générale, c'est principalement sur ce type de démarche que s'appuient les agences françaises ou européennes telles que l'ANSES ou l'EFSA pour évaluer le risque lié à l'exposition aux contaminants, en comparant une dose externe à des valeurs toxicologiques de référence. Si ces approches permettent une estimation assez précise de l'exposition dès lors que l'on s'intéresse à une source donnée (par exemple l'exposition de la population aux résidus de pesticides présents dans l'alimentation), elles ne permettent pas d'appréhender l'exposition à l'échelle de l'individu et nécessitent de répéter l'exercice pour chacun des compartiments lorsque l'on doit traiter une exposition dont les sources sont multiples.

La surveillance biologique humaine (ou biomonitoring) consiste à mesurer la dose interne à partir d'échantillons de sang ou d'urine, mais aussi, plus rarement de cheveux, de salive ou encore de lait maternel, de méconium ou de placenta lorsque la période d'observation et la sous-population ciblée le justifie. Le biomonitoring offre l'avantage de rendre compte de la concentration du contaminant dans l'organisme et donne accès à la somme des sources d'exposition, mais il ne permet que très rarement de les distinguer. Il est par ailleurs peu adapté aux substances ayant des demi-vies courtes.

Les modèles toxicocinétiques permettent de relier une concentration externe d'exposition à des concentrations internes. Les données de toxicocinétiques (relatives à l'absorption, la distribution tissulaire, le métabolisme, puis l'élimination d'un xénobiotique) sont donc particulièrement intéressantes pour la reconstruction de doses d'expositions à une substance à partir de données de concentrations internes mesurées (figure 1). Parmi ces modèles, les modèles PBPK (physiologically based pharmacokinetics) permettent d'extrapoler à l'homme des données recueillies chez l'animal, en intégrant différentes informations physiologiques et biochimiques. Le couplage des modèles PBPK aux modèles multi-milieux qui décrivent les transferts des substances d'un compartiment environnemental à un autre vise à offrir une meilleure intégration des données et à mieux caractériser le continuum environnement-homme.

Une revue récente (Brevan et al., 2017) de la littérature scientifique internationale publiée de 1990 à 2015 sur les données de l'exposition humaine aux pesticides a répertorié plus de 700 articles scientifiques. Après avoir appliqué des critères de sélection (exclusion des organochlorés, matrices pertinentes pour l'exposition des travailleurs, études nord-américaines ou européennes, qualité des études, etc...), 178 articles ont été retenus et ont fait l'objet d'un examen approfondi, après avoir appliqué des critères de sélection (exclusion des organochlorés, matrices pertinentes pour l'exposition des travailleurs, études nord-américaines ou européennes, qualité des études). Moins de 3 % de ces derniers émanent d'équipes françaises, montrant l'insuffisance de notre effort de recherche et la faible visibilité de nos travaux dans ce domaine.

2. Positionnement par rapport à la situation actuelle

L'étude des relations causales entre maladies et facteurs environnementaux basées sur l'évaluation des niveaux d'exposition a pris un essor important au cours des dernières années avec l'apparition récente du concept d'exposome. *Ce terme, désormais inscrit dans la loi de santé publique française (LOI n° 2016-41 du 26 janvier 2016), regroupe toutes les atteintes à la santé qui ne sont pas d'origine génétique.* Il comprend toutes les expositions environnementales, de la période prénatale (*in utero*) à la fin de vie, en sachant que contrairement au génome, l'exposome est une entité très variable et dynamique qui évolue tout au long de l'existence de l'individu (Wild, Cancer Epidemiology, 2005). Il prend en compte les nuisances de nature physique, chimique, biologique, radiologique ou psychologique et comprend les facteurs liés au mode de vie (activité physique, comportement alimentaire, déterminants sociétaux, stress, etc...). Rappaport et Smith (2010) et le rapport du NRC (2012) définissent l'exposome comme la surveillance de toutes les expositions internes (imprégnation) et externes (eco-exposome) auxquelles les individus sont soumis au cours de leur vie. L'ambition est ici de découvrir de nouvelles associations entre exposition et maladies.

Ce concept offre une vision multidimensionnelle et intégrée de la santé qui va bien au-delà de l'exposition aux contaminants chimiques. Il ouvre des perspectives de recherches considérables dans de nombreux champs disciplinaires parmi lesquels, la biologie, la chimie, la biochimie, la bioinformatique, les statistiques, les mathématiques, la toxicologie, ou encore l'épidémiologie. La caractérisation de l'exposome nécessite de multiples méthodologies d'évaluation de l'exposition, comprenant non seulement des analyses d'échantillons biologiques, mais également la mesure de l'environnement de chaque individu, en utilisant par exemple des capteurs connectés, complémentaires des questionnaires quelquefois inadaptés ou insuffisamment précis (Ntzani et al., 2013).

La composante chimique de l'exposome constitue néanmoins une pièce essentielle du jeu de données qu'il faut pouvoir assembler pour appréhender les causes environnementales des maladies chroniques, au-delà des liens de causalité connus entre ces maladies et la consommation de tabac et d'alcool, l'inactivité physique, une alimentation excessive ou déséquilibrée ou encore la pollution atmosphérique en milieu urbain.

Trois projets ont été financés par le programme-cadre 7 de l'UE afin de faire progresser la connaissance de l'exposome au cours de plusieurs fenêtres de temps, grâce à la mise au point de méthodes d'évaluation et d'analyse de l'exposition, et reliant l'exposome avec un certain nombre de paramètres de santé. Ces 3 projets ont opté pour des approches sensiblement différentes. Les efforts du projet HELIX portent principalement sur l'exposome de la période périnatale en se concentrant sur des cohortes européennes mères-enfants. Le consortium du projet EXPOsOMICS s'est intéressé en premier lieu à l'impact de la pollution de l'air et de l'eau sur les maladies chroniques, en privilégiant les approches « omiques », en particulier transcriptomiques et métabolomiques alors que HEALS, coordonné par l'Université Pierre et Marie Curie couvre un éventail important de tranches d'âge et de substances chimiques et propose différentes approches pour étudier le lien exposome-santé, notamment dans le cas des maladies métaboliques, des maladies neurodégénératives et de l'allergie.

A ces projets, il convient d'ajouter l'initiative européenne HBM4EU (programme cadre H2020, 2017-2021) qui a pour objectif d'évaluer l'exposition humaine aux substances chimiques en Europe (incluant les pesticides), afin de mieux comprendre leurs effets et d'améliorer l'évaluation des risques chimiques.

Dans chacun de ces programmes, les acteurs de la recherche sur l'exposome soulignent d'une part le manque d'infrastructures permettant de prendre en charge la mesure de l'exposome et d'autre part la nécessité de développer les méthodologies analytiques, bioinformatiques et statistiques permettant de produire, traiter, intégrer et analyser les données massives produites par ces approches (Stingone et al., 2017)

Bien que les progrès accomplis au cours des 10 dernières années en chimie analytique aient été considérables, il reste des obstacles importants à surmonter pour accéder à l'exposome chimique. Accéder à plusieurs centaines de molécules (ou à leurs métabolites), dans des échantillons biologiques de faible volume, et à un coût et dans un délai raisonnables, nécessite des approches nouvelles, des développements méthodologiques importants et des infrastructures performantes. La mesure des expositions par le biomonitoring doit non seulement s'appuyer sur la quantification de traces de résidus chimiques, mais également sur la recherche de biomarqueurs d'exposition qui peuvent être des métabolites de substances chimiques ou d'adduits à des macromolécules. Une grande partie de ces biomarqueurs est pour l'instant inconnue.

Pour les polluants organiques tels que les pesticides, il convient d'adopter une stratégie donnant accès à un nombre toujours plus élevé d'analytes dont certains ne sont pas forcément connus. Les développements récents proposent une combinaison d'approches non ciblées et ciblées, généralement basées sur des analyses en spectrométrie de masse (Andra et al., 2017)

Les méthodes non ciblées consistent en la détection et l'identification des contaminants ou de leurs métabolites dans les matrices biologiques, par des techniques spectrométriques haut-débit. Elles permettent de détecter un contaminant (ou un biomarqueur associé) sans qu'il ait été préalablement listé parmi les substances à rechercher. Ce type d'approche permet de renseigner l'exposition à des polluants émergents à partir des signaux spectrométriques déjà collectés, sans avoir à renouveler l'analyse. La limite de cette approche lorsqu'elle est utilisée seule est qu'elle aboutit à une quantification moins juste que celle produite par des méthodes ciblées.

Les méthodes ciblées permettent l'analyse quantitative des contaminants ou de leurs métabolites dans des matrices biologique (plasma, urine, cheveux, placenta, méconium, etc...). Elles ne sont possibles qu'à partir d'une liste pré-établie de substances recherchées.

L'objectif de la caractérisation de l'exposome chimique étant la détermination des liens entre l'exposition à des xénobiotiques et les troubles de la santé, certaines techniques analytiques, telles que la métabolomique, sont prometteuses pour caractériser les relations exposition-maladie. La métabolomique mesure quantitativement le changement dynamique des métabolites de faible poids moléculaire et leurs intermédiaires dans les organismes vivants en réponse à des stimuli externes ou à une modification génétique. Il est donc envisageable, à partir de l'analyse d'un même échantillon de déterminer à la fois des biomarqueurs d'exposition et d'effet et de ce fait permettre d'établir un lien entre une dose interne et un effet. Il faudra alors être en mesure de différencier la variation physiologique normale des modifications induites par l'environnement et d'évaluer si l'effet biologique observé indique un dysfonctionnement capable d'entraîner une maladie.

Les analyses, à haut débit, d'analytes multiples extraits de matrices biologiques complexes et variées conduit à la production de données massives qu'il convient de traiter, d'interpréter, de représenter et de stocker de façon appropriée. Il s'agit là d'un

autre défi, bio-informatique cette fois, dont il faut tenir compte à la fois en matière d'infrastructure et de compétences.

Appréhender l'exposome chimique, et de ce fait la multi-exposition, revient à caractériser l'exposition des individus à l'échelle populationnelle et individuelle, et à considérer la composante temporelle (différents stades de la vie) et spatiale (zone géographique, milieu de vie) de la contamination. S'agissant de la population générale cela nécessite de disposer de cohortes dont les caractéristiques (suivi dans le temps, répartition géographique, bio-banques) permettent de couvrir cette dimension spatio-temporelle.

Afin d'établir le lien entre environnement et santé humaine, l'objectif de l'acquisition de données sur l'exposome est de déterminer la quantité/concentration d'une substance ou d'un métabolite à son site de toxicité chez un individu afin de la comparer à des valeurs toxicologiques de référence et d'en évaluer le risque. Il est rarement possible d'obtenir des échantillons prélevés à partir de tissus cibles. Il y a donc lieu de disposer des modèles toxicocinétiques qui permettent d'établir le lien entre la concentration à la cible et celle mesurée dans un échantillon biologique accessible au prélèvement.

3. Objectif et priorités pour le projet de PPR:

L'objectif est de caractériser au mieux l'exposome chimique de la population française à différents stades de la vie (incluant la période *in utero*) en ciblant en priorité les produits phytopharmaceutiques.

Pour atteindre cet objectif, il conviendrait de doter la France d'une **infrastructure de référence sur l'exposome chimique**, capable de répondre aux multiples défis de la problématique et visible au niveau Européen. Cette infrastructure mettra la France en capacité de répondre aux questions complexes de la multiexposition aux produits phytosanitaires et plus généralement aux contaminants environnementaux. Elle permettra de franchir un pas déterminant en matière de lien environnement-santé et pourra donner à terme, aux équipes de recherches françaises, la possibilité de revendiquer le leadership européen dans ce domaine.

Les développements méthodologiques qui auront été entrepris en matière de biomonitoring chez l'Homme et les bases de données qui auront été constituées sur la caractérisation des résidus de pesticides dans les matrices biologiques pourront à moyen terme servir à la mise en place d'une surveillance des milieux et des écosystèmes.

Sont concernés : les établissements de recherche publique : INSERM, EHESP (IRSET), ANSES, INRA, CEA, CNRS, universités, écoles, etc., les industriels concepteurs des outils analytiques, le Ministère en charge de la santé (gestion et exploitation des cohortes, épidémiosurveillance Santé Publique France), le Ministère en charge de l'agriculture et de l'alimentation (plateforme d'épidémiosurveillance de la sécurité sanitaire de la chaîne alimentaire).

4. Suggestions de modalités d'actions

Le développement ou la création d'une infrastructure de recherche dédiée permettrait de :

- Développer les méthodologies (ou combinaisons d'approches) permettant l'identification et l'analyse quantitative des produits phytopharmaceutiques présents à l'état de traces dans les matrices biologiques humaines (sang/plasma, urine, cheveux, placenta, méconium, etc...). Dans le cadre de ce développement, il conviendra (1) de privilégier le recours à des méthodes haut-débit basées non seulement sur l'analyse des produits phytopharmaceutiques eux-mêmes, mais également sur des biomarqueurs spécifiques (métabolites urinaires par exemple), (3) d'évaluer l'intérêt d'une combinaison d'approches ciblées et non-ciblées permettant à la fois d'identifier un profil d'exposition le plus large possible (incluant des contaminants émergents) et la quantification des composés présents.
- Explorer la possibilité de déterminer la source d'exposition à partir d'un ensemble de biomarqueurs d'exposition détectés dans différentes matrices.
- Développer les modèles permettant d'intégrer les données relatives aux doses internes et les doses externes d'exposition.
- Identifier, caractériser et quantifier les biomarqueurs d'effet des produits phytopharmaceutiques en privilégiant les approches omiques
- Intégrer données d'exposition et données de santé.
- Rendre possible l'inter-comparaison des résultats des analyses d'exposition (exploitation des cohortes notamment), en veillant à l'intégration et la validation des méthodes développées
- Développer des méthodologies fiables d'interprétation et de représentation des données, aborder la dimension temporelle,
- Contribuer à la structuration de bases de données de référence environnementales et humaines avec leurs profils et évolutions.

4.2 Favoriser la transition des systèmes de culture pour renforcer la prophylaxie, réduire l'impact des bioagresseurs et l'utilisation des pesticides

Marie-Hélène JEUFFROY, François COTE, Laurence FONTAINE

1. Situation actuelle et ambition

Pour viser des réductions fortes de l'usage des pesticides, tout en maintenant les marges économiques des agriculteurs, de nouveaux systèmes sont donc à inventer. Malgré des politiques publiques successives affichant un objectif de réduction de la dépendance aux pesticides, l'usage continue à augmenter car les conditions d'une telle reconception ne sont pas encore réunies.

C'est pourquoi, dans le cadre de ce PPR, nous proposons de définir une cible beaucoup plus ambitieuse, qui imposera de travailler non seulement sur des techniques nouvelles, mais aussi, sur des dispositifs et moyens favorisant leur conception et leur mise en œuvre, sur les évolutions du raisonnement des systèmes agricoles et sur l'organisation du système de R&D agricole : **des systèmes conduits sans (ou presque sans) pesticide**. Se donner un tel objectif impose de mobiliser et d'inventer tous les moyens susceptibles de réduire les risques d'occurrence et d'épidémie, même si, en présence d'une infestation

imprévue, on acceptera, seulement en dernier recours, d'appliquer un pesticide. Cette cible de recherche nous semble incontournable pour concevoir les modes de culture qui maximiseront les chances de réduire de manière très significative les pesticides. Se donner un tel objectif ambitieux nous oblige à explorer et exploiter toutes les synergies entre techniques, en accordant une attention particulière à leur stabilité selon les conditions environnementales. S'il existe aujourd'hui quelques essais visant, en conventionnel, une suppression totale des pesticides (le réseau Res0Pest de l'INRA, par exemple), la quasi-totalité des projets de R&D réalisés jusqu'à présent ont privilégié un objectif de réduction, plus ou moins importante, de leur usage (30%, 50%, parfois pas d'objectif quantifié). Il s'agit donc d'un vrai nouveau défi de viser cette cible.

Parmi les différentes approches à considérer pour réduire de façon conséquente l'usage des pesticides de synthèse, voire de s'en affranchir, celles visant une réduction des risques « en amont », avant l'arrivée des bioagresseurs, ou de façon à les limiter à un niveau n'ayant pas d'impact sur la production, doivent être privilégiées car, même si elles sont plus difficiles à mettre en œuvre que des techniques de substitution, elles auront un effet plus fort sur la réduction des bioagresseurs et donc de leurs impacts, à l'échelle du système de culture. Plusieurs principes prophylactiques, à la base de la protection intégrée des cultures (Altieri et al., 1983 ; Dent, 1995 ; Flint et Gouveia, 2001 ; Meynard et al., 2003), sont d'ores et déjà connus : diversifier les rotations, cultiver des variétés résistantes aux maladies et compétitives vis-à-vis des mauvaises herbes (voire à caractère répulsif pour certains insectes), associer plusieurs variétés complémentaires sur ces caractères, cultiver simultanément plusieurs espèces dans une même parcelle, introduire des plantes de service en interculture et/ou associées à une culture de rente, raisonner le travail du sol pour maîtriser les populations de bioagresseurs (notamment adventices), valoriser les effets allélopathiques de certaines espèces végétales (vis-à-vis d'adventices ou de pathogènes du sol), introduire et gérer des infrastructures agroécologiques pour favoriser les auxiliaires (ennemis naturels des ennemis des cultures), raisonner collectivement la localisation spatiale des cultures au sein d'un paysage (une même année, et surtout d'une année à l'autre en grandes cultures) de manière à réduire les flux de bioagresseurs entre parcelles, inventer des dispositions spatiales originales des espèces pérennes, utiliser des semences propres, faucher les abords des parcelles pour limiter l'importation de graines d'adventices, etc. Ces grands principes prophylactiques ne sont aujourd'hui connus et maîtrisés que sur un petit nombre d'espèces ou de systèmes de production, ou étudiés de façon segmentée. La littérature scientifique, qu'elle soit basée sur des expérimentations (e.g. Chikowo et al., 2009 ; Debaeke et al., 2009 ; Loyce et al., 2008 ; Mehta et al., 1992 ; Verret et al., 2017 ;) ou sur une analyse des pratiques des agriculteurs (e.g., Lechenet et al., 2017 ; Mailly et al., 2017 ; Salembier et al., 2016), a déjà donné la preuve, a posteriori, de l'efficacité de telles pratiques sur la réduction des risques, et de l'usage des pesticides. Cependant, nombre d'espèces et de systèmes de production restent orphelins de connaissances sur les moyens combinés à mettre en œuvre pour réduire, de manière radicale, la pression de bioagresseurs.

Le choix de ces mesures prophylactiques est très dépendant du contexte socio-économique et des moyens à disposition dans les exploitations agricoles. Et leurs effets sont fortement influencés par les conditions environnementales et les modalités de leur mise en œuvre. Par ex., si le labour peut être utile pour enfouir des résidus de culture infestés par un champignon pathogène, et donc mettre à l'abri de cette infestation la culture suivante, il peut avoir l'effet inverse s'il conduit à remonter à la surface les résidus infestés de la culture ante-précédente (Colbach et Meynard, 1995) : l'effet du labour sur

les maladies telluriques dépendra donc des modalités de réalisation de cette technique, en interaction avec la succession de cultures. Or, ces conditions de réussite sont rarement définies et disponibles dans la littérature scientifique, car elles résultent, avant tout, d'une analyse de la mise en pratique, au regard des caractéristiques de la situation agricole. Leur caractérisation devrait donc bénéficier des connaissances des acteurs du terrain. De plus, les techniques culturales ont des effets partiels sur les bioagresseurs, ce qui implique qu'un contrôle élevé de ces organismes exige la mobilisation d'une combinaison de pratiques ayant des effets complémentaires. Ainsi, la réduction des maladies aériennes sur blé est accrue si on combine un retard de semis, une réduction de la densité de semis, une réduction et un retard du premier apport d'azote, et l'utilisation de variétés résistantes (Loyce et al., 2008). Mais peu de travaux de recherche ont, jusqu'à présent, permis de proposer, évaluer et caractériser des stratégies préventives efficaces pour maîtriser l'apparition ou le développement des bioagresseurs, sur un grand nombre de cultures ou de systèmes de culture, y compris tropicaux. Par ailleurs, les modalités de contrôle a priori des bioagresseurs dépendent fortement de la situation agricole (et même parfois, de l'année). Le choix et la mise en œuvre des modalités les plus efficaces bénéficient alors d'un diagnostic initial de la situation, permettant d'identifier les problèmes majeurs à résoudre, comme souvent réalisé en agriculture biologique (AB), puis d'une mise en œuvre et d'un réajustement des techniques choisies en fonction des résultats obtenus : il s'agit donc de mettre en œuvre de véritables boucles de progrès, dans un processus de conception pas-à-pas (Meynard et al., 2012 ; Coquil et al., 2014). Or, les méthodes et moyens à disposition des agriculteurs pour réaliser le diagnostic, concevoir le système permettant a priori de générer les solutions y répondant, évaluer les résultats obtenus, ne sont pas réellement disponibles, du fait d'une logique historique et dominante de raisonnement, basée davantage sur une artificialisation du milieu par l'utilisation massive d'intrants. Il est donc nécessaire de produire les moyens et les dispositifs permettant la réalisation de ces boucles de progrès.

Les méthodes de production intégrée les plus maîtrisées sont d'ores et déjà mises en œuvre par un nombre croissant (mais encore faible) d'agriculteurs. Par exemple, des conduites de culture à bas intrants existent et sont mobilisées pour le blé, le tournesol, le colza... Dans le Réseau national DEPHY FERME, des progrès dans l'évolution des systèmes de culture sont constatés (baisse moyenne de 18% de l'usage des pesticides depuis le lancement du réseau). Ces initiatives sont importantes, car elles peuvent servir de preuve de concept et de points de départ pour inspirer une reconception massive des systèmes de culture intégrant davantage de prophylaxie. De même, les initiatives lancées autour des Contrats de Solutions et des Certificats d'Economie de Produits Phytosanitaires (CEPP), visant à déployer les solutions existantes pour réduire l'utilisation, les risques et les impacts de pesticides, sont intéressantes. Mais ces solutions sont présentées indépendamment les unes des autres, sans proposition sur les combinaisons efficaces et indispensables pour atteindre des réductions d'usages aussi ambitieuses que celles visées par ce PPR. Par ailleurs, elles se heurtent au verrouillage sociotechnique du secteur agricole et alimentaire autour des pesticides, qui résulte d'une adaptation très efficace des acteurs, de leurs activités et de leurs relations mutuelles, à la disponibilité et à la grande efficacité des produits phytosanitaires en agriculture (Lamine, 2010 ; Meynard et al., 2018). Le déploiement des solutions existantes ne réussira pas sans une évolution majeure et coordonnée de l'ensemble des acteurs.

Viser des systèmes sans pesticides ne signifie pas nécessairement travailler en Agriculture Biologique. Des ressources existent au niveau de systèmes en AB, qui

reposent sur des principes de prévention, et donc la mobilisation large de méthodes prophylactiques. Cependant, la possibilité, dans les systèmes conventionnels, d'utiliser des engrais de synthèse, permet d'atteindre, dans certaines conditions, même sans pesticides, une productivité plus élevée que celle des systèmes en AB, comme on peut le voir sur des associations plurispécifiques (Pelzer et al., 2014), sur une synthèse d'expérimentations systèmes (Hossard et al., 2016), ou sur les premiers résultats des systèmes du res0Pest, mis en place à l'INRA (Colnenne-David, com. Pers.). En contrepartie, utiliser de l'engrais minéral accroît les risques de certains bioagresseurs (maladies et adventices notamment). C'est donc un usage particulièrement raisonné de cet intrant qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre pour atteindre des compromis acceptables entre réduction de la pression des bioagresseurs et augmentation de la productivité. Néanmoins, les systèmes en AB, n'utilisant pas ou peu de produits phytosanitaires, constituent des ressources (et donc des objets d'étude très intéressants) pour mettre au point des systèmes conventionnels économes en pesticides. Les stratégies qui y sont développées privilégient l'approche préventive (méthodes prophylactiques), pour ne mobiliser qu'en dernier recours des méthodes curatives (désherbage mécanique, produits de biocontrôle). En système conventionnel, l'utilisation de pesticides en dernier recours offre des possibilités plus grandes de résoudre des problèmes sans réelle solution aujourd'hui, comme par exemple un envahissement de parcelles en rumex. Encore faudrait-il définir les conditions (est-ce que tous les leviers préventifs ont bien été activés ?) et les seuils (quand considère-t-on qu'il faut agir chimiquement ?) au-delà desquels une intervention exceptionnelle semble indispensable. De plus, l'azote est, encore aujourd'hui, un facteur limitant majeur des systèmes en AB. Or la faible disponibilité de fumure organique, dans les systèmes bio en développement, ou dans les systèmes tropicaux, contraint fortement la productivité de ces systèmes, qui, en revanche, peut être accrue en conventionnel, où l'azote minéral pourrait être mobilisé, mais de manière parcimonieuse.

Les effets des techniques alternatives aux pesticides sont très sensibles aux conditions environnementales et socio-économiques, et à la grande diversité des systèmes de culture actuels. De fait, le passage à grande échelle de systèmes de culture exemplaires, performants économiquement et sans pesticides, et donc maximisant la prophylaxie vis-à-vis des bioagresseurs, nécessite une reconception, adaptée localement, de systèmes en rupture par rapport aux systèmes actuels. Cette reconception ne peut être la seule initiative de la recherche, et doit mobiliser, pour intégrer les connaissances des contextes locaux, les acteurs concernés par les pratiques agricoles et par la valorisation des produits récoltés (stockage, tri éventuel, transformation, voire consommation). Pour réussir le déverrouillage du système, cette reconception doit reposer sur une mobilisation concertée des agriculteurs, des entreprises d'amont et d'aval, des entreprises de collecte-stockage, de la R&D agricole, des pouvoirs publics, mais aussi, ne l'oublions pas, des consommateurs : la demande de produits à bas prix et d'apparence extérieure irréprochable n'est en effet guère compatible avec l'exigence de réduction des pesticides ; concevoir des systèmes diversifiés avec plus de légumineuses, nécessite une évolution des modes de consommation avec des régimes intégrant mieux ces légumineuses (Magrini et al., 2018). Favoriser la prophylaxie dans les systèmes de culture nécessite de penser et d'agir de manière systémique, et de changer de critère de performance pour évaluer les systèmes de production. Etant donné les liens forts qui existent entre ces différents maillons de la chaîne alimentaire, et le besoin immense d'innovations pour atteindre la cible ambitieuse du 0 pesticide, c'est à une véritable reconception du système alimentaire qu'il s'agit de s'attaquer (Tilman et Clark, 2015).

Enfin, construire les solutions de demain ne peut pas se faire sans intégrer le changement du climat. En effet, repousser la date de semis de céréales d'automne de 15 jours sera-t-il encore suffisant pour réduire les pesticides, avec les automnes doux observés depuis plusieurs années ? Comment anticiper et éviter des épidémies rapides de pathogènes émergents, renforcées par le changement climatique ? Quelles plus-values de systèmes diversifiés (à l'échelle de la rotation, de la parcelle, de l'exploitation agricole, du paysage) pour apporter de la résilience face aux aléas climatiques accrus, et à leurs impacts économiques ? A noter que cette diversification des systèmes s'applique autant à des systèmes assolés que pérennes (prairies à flore variées en enherbement de l'inter-rang, pâturage de l'inter-rang, cultures intercalaires entre rangs de vigne ou de fruitiers, vergers multi-variétaux, systèmes maraîchers basés sur des associations d'espèces...), en systèmes tempérés et tropicaux. Pour les systèmes pérennes, la question de l'anticipation de l'évolution climatique se pose de manière encore plus prégnante

2. Positionnement par rapport à la situation actuelle

Mettre au point des systèmes sans pesticides, à haute productivité, avec des marges économiques satisfaisantes, suppose des changements en profondeur des itinéraires techniques, des rotations et des mosaïques paysagères. Dans l'état actuel des connaissances et étant donné la diversité des situations agricoles, on ne sait pas définir les caractéristiques techniques d'une culture, d'un itinéraire technique ou d'un système de culture, conduit sans pesticides. D'ailleurs, ces caractéristiques différeront selon les traits de la situation agricole et les objectifs de l'agriculteur. Mettre au point de tels systèmes en rupture demande donc de **mettre en place, à grande échelle, des processus de conception innovante** (Hatchuel et Weil, 2002 ; Prost et al., 2017), c'est-à-dire des processus au cours desquels l'identité et les propriétés de l'objet en construction se définissent progressivement, ainsi que les critères de son évaluation. De tels processus peuvent viser à inventer des systèmes de culture cibles, en rupture par rapport à l'existant, vers lesquels l'agriculteur va tendre, par un processus de conception *de novo*. Ils peuvent également viser à accompagner l'évolution progressive de systèmes existants, par un processus de conception pas-à-pas, favorisant l'apprentissage progressif du pilote (Meynard et al., 2012). Pour mettre en œuvre la conception innovante, on mobilise et on pourra valoriser les connaissances déjà disponibles (cf infra) sur les processus biologiques naturels permettant de maîtriser les bioagresseurs, et les techniques susceptibles de favoriser ces régulations naturelles. Mais les ruptures exigées par les systèmes sans pesticides, et la diversité des situations agricoles, exigeront également de produire des connaissances supplémentaires, qui font aujourd'hui défaut pour poursuivre le processus de conception jusqu'à la production d'une innovation opérationnelle. S'il est difficile, et souvent impossible, de les identifier avant d'engager des processus de conception, elles peuvent, en revanche, se révéler au cours de ce processus, permettant ainsi de le mener à bien (Toffolini et al., 2018). Ceci nécessite des **dispositifs de recherche-action adéquats** pour raisonner et mener à bien, de manière conjointe, l'invention des systèmes en rupture, l'identification et la production des connaissances nécessaires à la conception et la mise en œuvre de ces systèmes, ainsi que leur test et leur amélioration, dans les conditions de la réalité agricole.

Les enjeux de recherche pour des systèmes « 0 pesticide » sont donc de trois grands types, qui devront être étroitement articulés entre eux pour espérer produire à la fois des solutions opérationnelles, des connaissances génériques, et des méthodes de travail robustes :

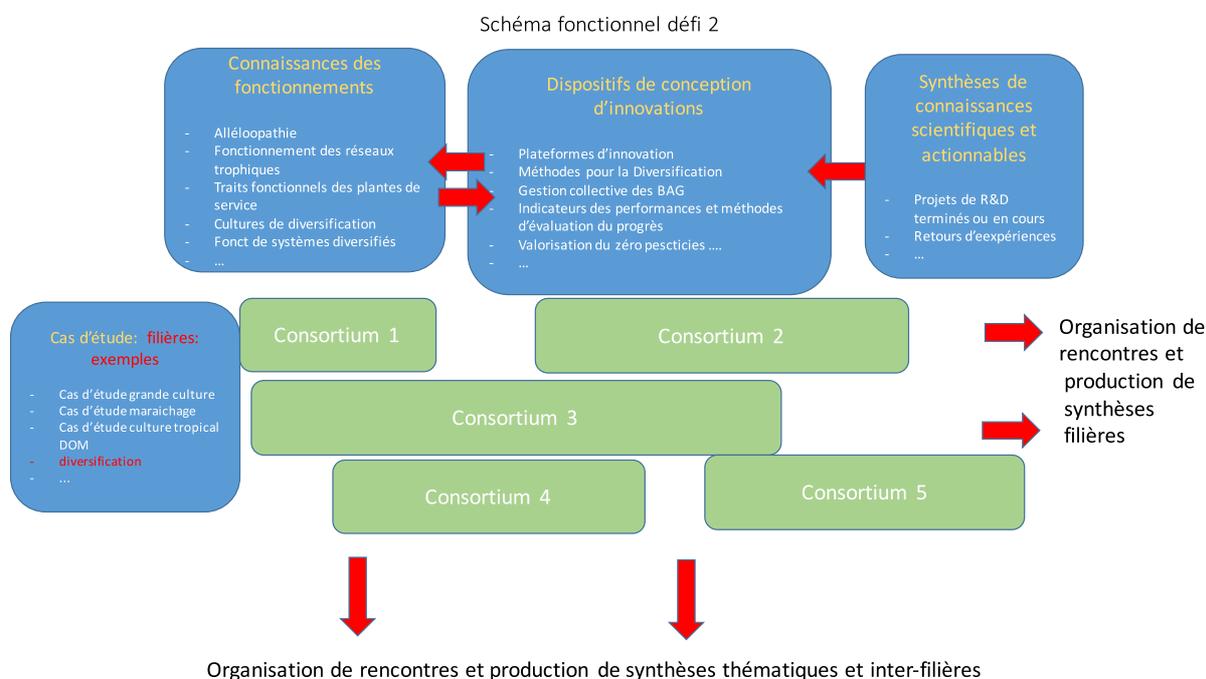
- (a) Produire des connaissances sur des processus peu étudiés, nécessaires à la mise en œuvre de leviers techniques et stratégies efficaces pour une prophylaxie maximale des systèmes agricoles ;
- (b) Proposer et mettre à l'épreuve des innovations techniques permettant la suppression des pesticides, en caractérisant leur robustesse vis-à-vis de la diversité des contextes de leur mise en œuvre, et leurs conditions de réussite ;
- (c) Produire des dispositifs, méthodes, outils pour accompagner la reconception et la mise en œuvre des systèmes de culture vers le 0 pesticides, impliquant les différents acteurs de la production à la consommation.

C'est sur ces 3 enjeux que se positionne le défi 2 du PPR, en ayant pour ambition de les combiner, dans des boucles de rétroactions : concevoir, avec les acteurs de la transition vers le 0 pesticide, des systèmes permettant un contrôle en amont des bioagresseurs, en mobilisant les connaissances génériques disponibles ; mettre à l'épreuve les systèmes envisagés ; identifier, par la mise en œuvre et les retours d'expériences, les connaissances manquantes à produire, et les produire.

De nombreux projets de recherche existent (ou sont déjà terminés pour certains) et contribuent à l'ambition de ce défi. Mais quasiment aucun n'a pour objectif de viser des systèmes sans pesticides et travaillant sur la combinaison de leviers et donc la conception de véritables stratégies prophylactiques. De ce fait, les connaissances disponibles et les solutions proposées dans ces projets ne suffiront pas à atteindre cette cible ambitieuse.

3. Objectifs et priorités

Nous proposons d'organiser les travaux de ce défi selon le schéma suivant, expliqué ci-dessous :



Nous avons identifié quatre sujets sur lesquels les connaissances sont particulièrement lacunaires, et sur lesquels il serait nécessaire de faire en priorité porter les travaux soutenus par le PPR :

(1) L'augmentation de l'utilisation de pesticides la plus importante dans les 10 dernières années est celle des herbicides. Or, en grande culture comme dans beaucoup d'autres systèmes agricoles, le développement important des infestations d'adventices est lié à un raccourcissement des rotations, qui induit (1) une réduction du délai de retour des espèces dans le temps, favorisant la spécialisation des adventices, (2) une augmentation de la fréquence d'utilisation des molécules d'herbicides, qui favorise les résistances des adventices. Or, de nombreux essais, comme l'expérience pratique des producteurs, montrent qu'une réduction des adventices et des herbicides est atteignable en diversifiant les rotations (Chikowo et al., 2009 ; Lechenet et al., 2017 ; Colbach et al., 2010 ; etc). La diversification est également profitable pour lutter contre maladies et ravageurs, en cassant les cycles de ces derniers. Il devient donc urgent de **contribuer à la diversification des systèmes de culture, à grande échelle**. Or, pour atteindre cet objectif, nous faisons face à un **manque cruel de connaissances actionnables⁶ sur les espèces « mineures », et sur leur insertion dans les systèmes de culture, y compris sous forme de cultures associées**. Depuis de nombreuses années, la recherche a concentré ses travaux (écophysiologie, génétique, pathologie, santé des plantes) sur un petit nombre d'espèces majeures, délaissant les espèces indispensables à la diversification. Aujourd'hui, ce retard dans les connaissances nécessaires à l'action ne pourra être rattrapé que si de nouveaux dispositifs de production de connaissances, étroitement connectés aux processus de conception, sont mis en place, de manière à identifier les trous de connaissances prioritaires à combler, et à combiner la production de ces connaissances avec les dynamiques de conception de systèmes diversifiés. La question des caractéristiques de ces espèces de diversification, pour permettre un contrôle massif des bioagresseurs, sera à traiter conjointement avec le défi 3. **Un premier axe de recherche viserait donc à produire des connaissances utiles à l'action, de portée générique, permettant de raisonner l'insertion de cultures de diversification dans les systèmes de culture**.

(2) Si le NODU insecticide est resté stable dans les 10 premières années du plan Ecophyto, nous avons assisté à une augmentation dramatique des résistances des insectes aux molécules appliquées et nous pouvons craindre (car déjà observé) des invasions liées aux évolutions du climat. Aussi, maîtriser les populations d'insectes est également une priorité. Or, ces organismes sont mobiles et circulent facilement, jusqu'à des distances de plusieurs km, entre les parcelles, facilitant ainsi la diffusion des infestations au sein des paysages. Pour un certain nombre d'insectes et de cultures, des techniques de lutte par conservation, visant à favoriser le maintien des auxiliaires dans le paysage, peuvent être efficaces, à condition qu'elles soient raisonnées collectivement à l'échelle de ce paysage (Rusch et al., 2010). Or, les

⁶ Connaissance actionnable = *un savoir valable et pouvant être "mis en action" dans la vie quotidienne* (Argyris, 1995); connaissances reconnues sur les plans académique et de la pratique (Adler et al. 2003)

modalités des techniques de contrôle collectif dépendent des traits de vie des insectes et de leurs ennemis naturels, ainsi que du « paysage de pratiques » dans lequel ils évoluent. **Un second axe viserait donc à concevoir et évaluer des modalités de gestion collective des bioagresseurs, à l'échelle du paysage, s'appuyant sur une connaissance des caractéristiques de vie des bioagresseurs et des auxiliaires et des réseaux trophiques, et tenant compte des systèmes de culture cultivés dans ce paysage, ainsi que sur une connaissance de l'action collective et des apprentissages collectifs.**

- (3) L'agroécologie repose sur la mobilisation et la valorisation des processus naturels de régulation des bioagresseurs. Parmi ceux-ci, les **effets allélopathiques** ont été très peu étudiés dans la littérature, alors qu'ils constituent une voie prometteuse de contrôle naturel des bioagresseurs. Rappelons que l'allélopathie est définie comme l'effet, direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante ou d'un microorganisme sur un autre organisme, par le biais de composés biochimiques libérés dans l'environnement (Rice, 1984) : effet de cultures intermédiaires sur les adventices et les pathogènes du sol, effet de plantes de service associées sur l'attractivité des insectes, etc. Les propriétés allélopathiques de certaines plantes dépendent de métabolites secondaires qu'elles contiennent, mais aussi de la gestion de leur association avec les espèces principales et de leurs résidus. Et si des effets allélopathiques nombreux ont été bien mis en évidence en conditions de laboratoire, nous faisons face à un immense trou de connaissances sur les conditions d'expression de ces effets au champ, et sur la manière de raisonner les pratiques susceptibles de maximiser ces effets, en interaction avec le reste du système de culture. **Un troisième axe viserait donc à analyser les conditions d'expression des effets allélopathiques d'une diversité d'espèces au champ, à quantifier les effets susceptibles d'être attendus, et à proposer des modalités techniques permettant de maximiser l'effet allélopathique, en interaction avec le reste du système de culture.**
- (4) Le **travail du sol** constitue un levier mobilisable majeur pour contrôler les bioagresseurs : il a un effet direct sur la capacité de graines d'adventices à germer, sur la localisation des pathogènes du sol, et donc leur capacité à infester les cultures, sur la dynamique d'évolution de certains bioagresseurs (limaces) et auxiliaires (vers de terre, qui sont entre autres des ennemis naturels des nématodes). Cependant, les systèmes réduisant sensiblement le travail du sol se développent, d'une part pour des raisons économiques et d'organisation du travail, mais aussi en raison d'une défiance croissante concernant l'effet du travail du sol sur l'activité biologique du sol. Face à la diversité de ses effets et à l'enjeu majeur que constitue cette technique, il devient indispensable de développer des systèmes d'agriculture de conservation sans pesticides, et en particulier sans herbicides, en s'appuyant sur une meilleure connaissance des effets de différentes modalités de travail du sol, afin d'identifier et de proposer celles qui permettront de favoriser les effets de contrôle des bioagresseurs, sans compromettre les effets sur l'activité biologique « positive » du sol, le stockage de carbone, et les autres fonctions d'intérêt. Par exemple, peut-on recommander, dans un système en « non travail du sol » de réaliser

occasionnellement un travail du sol peu profond, qui peut être très efficace pour maîtriser des adventices, en particulier les vivaces ? Quels indicateurs mettre au point pour le choix de modalités de travail du sol efficaces vis-à-vis des bioagresseurs mettre au point ?

Un second type de travaux est nécessaire, sur les dispositifs, méthodes et outils permettant un déploiement de la conception innovante de systèmes 0 pesticide, impliquant les différents acteurs concernés. Nous avons identifié quatre sujets sur lesquels il serait nécessaire de faire porter les travaux soutenus par le PPR :

a. **Développer les méthodes favorisant la conception participative des leviers techniques**

- Méthodes d'analyse et d'accompagnement favorisant les **apprentissages** des producteurs vis-à-vis de techniques prophylactiques, dont les effets ne sont parfois observables ou mesurables qu'à moyen terme,
- **Traque aux innovations techniques** de terrain, favorables à la réduction de l'usage de pesticides : description des systèmes et de leurs trajectoires, analyse de leur logique agronomique et évaluation de leurs effets, pour construire des ressources techniques mobilisables pour la reconception et la transition.
- Méthode de **conception d'innovations couplées avec l'aval**, pour raisonner l'usage de pesticides, en intégrant l'ensemble de la chaîne, de la production à la transformation.
- en lien avec défi 3: **Conception** innovante et **couplée** de systèmes de culture et d'espèces et variétés favorisant la prophylaxie.
- en lien avec défi 3: **Méthode et critères d'association des espèces** et (des variétés) pour mieux contrôler les bioagresseurs, choix d'espèces et de pratiques (associations simultanées, en relais, plantes de services, ...etc).
- en lien avec défi 5: **conception innovante couplée** de systèmes de culture 0 pesticide et d'agroéquipement. Par ex., peut-on imaginer disposer de semoirs permettant le semis simultané de plusieurs espèces, à des profondeurs différentes ? Peut-on imaginer un ensemble coordonné de machines, permettant de cultiver (et récolter) des bandes étroites (voire des rangs) de plusieurs espèces dont le cycle est décalé dans le temps ?

b. **Développer des indicateurs** d'évaluation de tolérance aux bioagresseurs et de quantification de réussite de la prophylaxie

Comment apprendre à vivre avec certains bioagresseurs, sans dépasser les seuils préjudiciables, dont les valeurs changent dans des systèmes prophylactiques ? Par exemple, en AB, la présence de cortèges d'adventices non pénalisantes est tolérée ; la perception de la propreté d'une parcelle est très différente du conventionnel. Sur quels critères repérer des systèmes à fort effet prophylactique, afin de les analyser et de quantifier leurs bénéfices ? Quels indicateurs de pilotage du changement de conduite des systèmes (à court et moyen terme), sur un chemin de transition dont on ne connaît pas précisément le point d'arrivée ? **Contribuer à répondre à ces questions en développant des indicateurs fiables et appropriables par les différents acteurs du développement nous semble indispensable pour développer des productions tendant vers le 0 pesticide.**

c. **Identifier et développer les leviers organisationnels et politiques favorisant le développement des solutions techniques pour la transition vers le zéro pesticide (AB et non AB), en lien avec le défi 6**

- Identifier et concevoir des innovations (signe de qualité,...) favorisant la valorisation des produits issus de systèmes sans pesticides (type de marchés, ...etc), et tirer parti de cette connaissance pour développer les innovations techniques cohérentes.
- Analyser le fonctionnement de dispositifs collectifs territoriaux (et de leur gouvernance) efficaces pour accompagner la transition vers des systèmes sans pesticides (organisations spatiales des pratiques pour une maîtrise collective des bioagresseurs , paysages suppressifs); Comprendre les conditions socio-économiques et techniques d'innovations organisationnelles efficaces pour la transition: analyse du fonctionnement de niches d'innovations (logique agronomique et organisationnelle de la niche, stratégie des acteurs, dynamique des innovations, cohorte des stratégies alternatives, motivation des adoptants) comme sources de déverrouillage.
- Analyser la relation entre déploiement de pratiques prophylactiques, organisation du travail au niveau de l'exploitation agricole (rôle de freins ou de leviers des ETA dans le changement de pratiques agricoles vers la suppression des pesticides), gouvernance foncière, et financiarisation de l'agriculture (agriculture financière vs agriculture familiale) : coexistence des modèles d'agriculture et compatibilité avec la question de la prophylaxie.

d. **Développer des outils de capitalisation, de gestion et de partage des connaissances nécessaires à la reconception des systèmes**

- Quelles caractéristiques techniques et organisationnelles d'une base de ressources pour rendre compte des connaissances scientifiques, des savoirs experts et des expériences décrivant les moyens de favoriser la prophylaxie et la réduction de l'utilisation de pesticides, dans le but d'accompagner (par la formalisation de connaissances actionnables) la conception de systèmes adaptés localement. Si EcophytoPIC ou GECO sont aujourd'hui en cours de construction et de déploiement, leur efficacité à soutenir des processus de conception, en relation avec leur structure et leur contenu, reste encore à démontrer.

Le raisonnement des techniques culturales interagit étroitement avec les variétés, avec le machinisme agricole, avec l'utilisation de capteurs ou d'informations externes à l'exploitation (sur le climat, par exemple). Aussi, il est clair que ces innovations ne pourront pas être raisonnées indépendamment les unes des autres, suggérant de nombreuses interactions à construire entre les défis de ce PPR.

4. Suggestions de modalités d'actions

L'efficacité des techniques de prophylaxie est extrêmement dépendante du contexte dans lequel elles sont mises en œuvre. Ainsi, par rapport à un objectif d'action, de changement des systèmes, il n'apparaît pas suffisant de produire des connaissances génériques sur des processus biologiques mobilisables, sans décrire et tester simultanément leurs conditions d'intégration dans de nouveaux modes de productions.

C'est pourquoi, pour ce défi, nous proposons de privilégier :

- **Des travaux en « conditions réelles » de production** : cet ancrage dans la réalité du terrain est essentiel, d'une part, pour hiérarchiser les problèmes à résoudre et proposer de centrer les projets soutenus par ce PPR sur les problèmes les plus graves et orphelins de recherche, à définir par les scientifiques et leurs partenaires, et, d'autre part, pour mobiliser l'ensemble des acteurs motivés, et travailler directement dans les conditions d'application des solutions proposées.
- **Des travaux visant à construire simultanément des solutions techniques et les connaissances nécessaires à leur construction, et pour produire des méthodes et des innovations techniques.** Nous proposons donc de privilégier les travaux organisant des allers-retours entre des TRL⁷ bas (2 à 5) et hauts (6 à 9).

Nous proposons d'organiser le défi 2 selon trois axes qui permettront de couvrir l'ensemble des actions présentées précédemment. Ces trois axes seront complétés par un processus d'animation interne propre au défi 2.

- **Un axe « front de science »** sur les 4 points de connaissances mentionnés plus haut, et sur les méthodes permettant la transition (a, b, c ci-dessus). Les projets qui seront retenus favoriseraient les combinaisons entre des connaissances à produire et des méthodes originales de travail à produire.

- **Un axe « Déploiement de transitions 0 pesticide » sur les méthodes et outils permettant un déploiement de la conception innovante de tels systèmes, impliquant les différents acteurs concernés. Sur cet axe, il sera fait appel à des consortiums recherche-action-partenariat**, à l'échelle de filières ou de territoires, mobilisant des chercheurs, des producteurs, des acteurs du Développement Agricole (instituts techniques, chambres d'agriculture, ONVAR, CIVAM, etc), des acteurs économiques (OCS, transformateurs, distributeurs), des acteurs de la Société Civile (consommateurs, collectivités locales, collectivités territoriales, ONG). Ces consortiums auront l'ambition de réaliser des projets multi-acteurs combinant des travaux de recherche et d'innovation, débouchant sur des propositions de systèmes '0 pesticide' et leur valorisation. Ces consortiums s'appuieront sur des interactions entre acteurs et des boucles de rétroaction entre Recherche et Innovation, dans des dynamiques d'innovation ouverte et les interactions entre acteurs. Ces consortiums pourront intégrer des thèses (sur les sujets mentionnés ci-dessus et, par comparaison entre consortiums, sur les conditions génériques permettant le développement de systèmes de culture pour la réduction des pesticides). Ces projets pourraient alors avoir une durée approximative de 4-5 ans (pour avoir le temps de préparer et de réaliser des thèses, et de concevoir et évaluer des solutions techniques de prophylaxie). Systèmes bio et non bio peuvent être inclus dans ces propositions de systèmes 0 pesticide et sont même invités à être abordés en commun de façon à partager leurs ressources.

- **Un axe** visant spécifiquement à **produire des synthèses (i) scientifiques et (ii) opérationnelles** de résultats de projets de recherche antérieurs (et des résultats produits pendant la durée du PPR), c'est-à-dire visant la formalisation de connaissances actionnables (y compris analyse et traitements de données issues de différentes

⁷ L'échelle **TRL** (en anglais *technology readiness level*, qui peut se traduire par **niveau de maturité technologique**) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une **technologie** (matériel, composants, périphériques, etc.) notamment en vu de financer la recherche ou son développement. L'échelle comporte 9 niveaux de maturité (de 1 - faible - à 9 - fort) ; plus le niveau est haut, plus la technologie/ l'innovation est proche du marché.

expériences), la diffusion des connaissances aux différents types d'acteurs, et la quantification d'hypothèses pour des scénarios de développement futur d'une agriculture sans pesticides, incluant l'agriculture biologique). Un premier état des lieux rapide montre que plus de 200 projets ont déjà été financés sur la thématique de réduction des pesticides dans des projets européens, ANR, Casdar, PSDR, etc., sans qu'il y ait une visibilité forte des résultats opérationnels produits (et validés par leurs utilisateurs) dans ces projets.

Ces trois axes seront complétés par une **animation propre au défi 2** visant le partage des connaissances produites dans les différents projets issus du défi 2, ainsi que le partage des innovations du terrain. Cette animation se traduira particulièrement par l'organisation annuelle, en région, de **Rencontres-Terrain**, dans le but de **partager les innovations du terrain**, en particulier celles étudiées par les différents consortiums, de caractériser leur logique et leurs conditions de réussite, et de formaliser leur description (objectifs visés, logique agronomique, conditions de réussite, ...etc) dans des outils d'échanges (ex. GECO, plateformes d'échanges de savoirs, ...) pour une mobilisation élargie. Ces rencontres devront être organisées de manière à favoriser, outre des échanges informels entre leurs participants, une capitalisation des innovations présentées et échangées, en vue d'une utilisation ultérieure dans des dynamiques de reconception au sein de dispositifs d'innovation ouverte. Les connaissances produites dans le défi 2 auront vocation à être intégrées dans les bases de connaissances produites dans l'AAP3.

4.3 Développer des espèces et variétés permettant la reconception des systèmes et la transition agro-écologique

Isabelle LITRICO, Elodie LE CADRE, Emmanuel LESPRIT

1. Ambition

Tendre vers une disparition des pesticides pour la préservation de l'environnement tout en assurant une bonne production et une stabilité des rendements dans le temps et l'espace sous la pression du changement climatique constitue un objectif majeur de l'agriculture. La définition de solutions et innovations permettant de relever ce défi ne peut s'entreprendre sans coordonner toutes les composantes de gestion, en particulier les leviers indissociables de l'amélioration génétique et des pratiques culturales. Sur le plan biotechnique, il s'agit de développer le continuum entre la physiologie, la génétique, l'agronomie et l'écologie pour reconcevoir les systèmes de culture de demain et assurer leur protection. Dans le paysage actuel, la production de connaissances et d'innovations génétiques est le plus souvent travaillée indépendamment de celle relative à l'agronomie des systèmes de culture. Ce découplage est visible à l'échelle des projets nationaux mais aussi internationaux. Aussi il est important de replacer l'innovation variétale au cœur de la réflexion des nouveaux systèmes de cultures via une protection intégrée associant génétique végétale et pratiques culturales afin de contribuer efficacement au contrôle durable des maladies des plantes.

La mise en place de systèmes intégrés de protection des cultures nécessitera de connaître les mécanismes biologiques et écologiques ainsi que le déterminisme génétique à l'origine des défenses des plantes mais aussi des structures plus complexes qui pourront être introduites dans le cadre de la diversification des cultures. ***La caractérisation et la valorisation de la diversité, l'optimisation des interactions positives entre les plantes et organismes associés et la prise en compte des dynamiques évolutives*** seront des points à développer pour des innovations de rupture. Le renforcement et l'approfondissement des stratégies déjà maîtrisées, via la ***recherche de nouvelles sources de résistance, l'analyse de leur durabilité*** ou encore ***la combinaison de différents mécanismes/gènes de résistance soit par pyramidage, soit par une organisation raisonnée à l'échelle du paysage*** seront à coupler pour optimiser conjointement l'innovation variétale et les systèmes de production.

La mobilisation des outils de biotechnologie et de phénotypage haut débit permettra d'avancer dans les connaissances à acquérir pour la création variétale en interaction avec les pratiques culturales tendant à limiter l'incidence des maladies sur les systèmes de production.

Ainsi les objectifs de ce défi sont de, (i) **rendre les espèces cultivées plus résistantes à leurs pathogènes et ravageurs et plus compétitives vis-à-vis de leurs adventices via la création variétale**, (ii) **adapter les variétés à un plus grand niveau de complexité des couverts et de nouvelles pratiques palliant l'usage des pesticides** (iii) **lancer des processus d'amélioration de nouvelles espèces pour de nouveaux services afin de se mettre en capacité de construire de nouvelles filières**. Les cibles prioritaires seront les espèces cultivées majeures ainsi que les espèces fruitières, la vigne et les espèces tropicales. Toutefois, les espèces listées ci avant ne constituent pas une liste restrictive car il est important de considérer aussi les espèces susceptibles d'engendrer une augmentation de la diversité fonctionnelle dans les systèmes de cultures pour atteindre l'ambition de ce défi.

Parmi les orientations de recherche proposées, certaines reposent sur la mobilisation des connaissances actuelles et une focalisation des efforts sur les preuves de concept afin de permettre la mise en place d'innovations à court-moyen terme (i.e. durée du PPR) ; d'autres sur l'acquisition de connaissances académiques qui reste une priorité pour la mise en œuvre à moyen-long terme de solutions (Tab. 1). Pour chacune des pistes de recherche identifiées, il est mentionné l'état de l'art et le degré d'opérationnalité que l'on peut en attendre à court et long terme.

2. Les priorités thématiques identifiées

Piste prioritaire 1 : Identification de nouvelles sources et nouveaux mécanismes de résistances (traits et zones génomiques) dans les ressources génétiques disponibles et dans de nouvelles ressources à prospecter - Introduction dans les programmes de sélection - mécanismes physiologiques et génétiques de l'immunité

Le progrès génétique est conditionné par la disponibilité de diversité génétique dans le matériel d'intérêt. Il est donc indispensable de valoriser le plein potentiel des collections de ressources en vue de produire des variétés adaptées aux multiples enjeux des agricultures de demain en limitant l'impact des bioagresseurs de cultures. La valorisation des collections génétiques des espèces cultivées, de leurs apparentées sauvages et de nouvelles espèces d'intérêt, passe par une caractérisation et un criblage adaptés de leur diversité, via l'utilisation des outils de génotypage et de phénotypage. Les centres de ressources génétiques devront alors structurer l'accès aux données disponibles, y compris pour les espèces orphelines. La valorisation des collections permettra d'identifier des traits d'intérêt, de nouvelles sources de résistances et des voies plus durables de résistance. Dans ce cadre, et par exemple quand il n'existe pas de diversité naturelle utilisable chez une espèce, les biotechnologies et notamment l'édition du génome pourraient permettre d'éditer des caractères simples de résistance aux maladies, en reproduisant la diversité sous-jacente à la résistance observée chez certaines espèces (Thomazella *et al.* 2016). Les développements méthodologiques acquis dans le cadre des PIA, en particulier concernant le phénotypage, le séquençage haut débit et la sélection génomique, permettent d'envisager la mise en œuvre de schémas de pre-breeding et de sélection novateurs et efficaces via l'identification des zones génomiques impliquées dans les résistances. Ces développements méthodologiques permettent d'envisager l'accès aux caractères plus complexes ou encore mal connus, impliqués dans la résistance/tolérance des plantes, notamment les résistances de type « non-hôte ».

Il est clair que l'identification de sources de résistance est une étape préalable à la mise en place de stratégies de protection comme la stratégie de pyramidage de gènes. Certains résultats suggèrent que le pyramidage est une stratégie plus intéressante en termes de durabilité que l'utilisation séparée des gènes de résistance (Rex Consortium Members 2016 ; Mundt 2016). Mais d'autres études suggèrent le contraire (Djidjou-Demasse *et al.* 2017). Aussi tester l'efficacité de ces deux stratégies selon le type de résistances, selon les situations environnementales et agronomiques dans lesquelles elles sont mises en place sont des pistes prioritaires à explorer à différentes échelles spatio-temporelles pour définir des stratégies adaptées de déploiement de résistances.

Enfin, il est nécessaire de renforcer l'analyse des mécanismes de résistance et d'immunité et des voies de signalisation. Il conviendra d'élargir les champs de recherche concernant

les résistances, en ciblant des mécanismes différents des résistances contrôlées par gènes majeurs de type R. Ceci inclut l'étude des composantes de l'immunité ainsi que de la sensibilité des plantes, donnant lieu, à terme, à des approches de modifications géniques par la voie des biotechnologies ou de recherche de variants dans les ressources génétiques disponibles.

Piste prioritaire 2 : Analyse de la durabilité des résistances - Comprendre l'évolution des résistances en lien avec la gestion de la diversité in situ – programme complémentaire de la conservation ex situ et interface avec l'identification de nouvelles ressources

L'intérêt des collections des ressources génétiques pour identifier de nouvelles résistances à introduire en amélioration des plantes a été largement prouvé au cours des dernières années. Ces collections de ressources génétiques constituent un levier majeur pour l'amélioration et l'innovation variétale et poursuivre leur caractérisation et valorisation avec les outils modernes de la génétique et amélioration des plantes est nécessaire (piste 1). D'autres approches complémentaires doivent également être envisagées. Dans une agriculture à faibles intrants et dans un contexte d'aléas climatiques, les fluctuations environnementales locales sont accentuées et impactent les dynamiques et l'évolution des populations de bioagresseurs. Ainsi une réflexion et des actions doivent être conduites sur le maintien des ressources génétiques adaptées ou capables de s'adapter à ces variations locales et temporelles de l'environnement. Le développement de la conservation et la gestion de ressources *in situ* à travers une « gestion dynamique » qui consiste à construire des populations à base génétique large et à gérer ces populations dans des dispositifs multi-sites peut être une solution complémentaire à la conservation *ex situ* des ressources. Ces populations hétérogènes sont soumises aux pressions de sélection locales, notamment celles issues des populations de multiples bioagresseurs. Ces pressions sont variables au cours du temps, et l'évolution des populations de plantes se fait sous sélection et sous différents mécanismes de l'évolution tels que la mutation, la recombinaison, la dérive génétique.... L'objectif est de maintenir un potentiel adaptatif au sein de ces réseaux de populations et d'orienter l'évolution de ces populations vers des formes adaptées aux conditions climatiques et aux pratiques agronomiques.

La mise en place d'une telle gestion *in situ* de la diversité des espèces d'intérêt permettrait donc de disposer de ressources génétiques originales en termes notamment de tolérances et de résistances aux bioagresseurs et dont l'étude améliorerait la compréhension des relations qui existent entre les plantes cultivées, les bioagresseurs et les variables climatiques. Ceci permettra d'une part d'alimenter l'amélioration génétique des cultures mais aussi de mieux comprendre l'évolution des pressions des bioagresseurs et ainsi appliquer des mesures prophylactiques adaptées. La gestion de telles populations de plantes permettra en outre d'identifier des résistances génétiques durables dans un contexte d'environnement multi-stress et variable, d'étudier les mécanismes biologiques associés et leur stabilité. L'identification de mécanismes généraux de résistance/défense partagés entre différents pathosystèmes permettrait de mettre en place des résistances à large spectre. De plus, des comparaisons entre agents pathogènes différents et les pressions qu'ils génèrent pourraient être conduites. Privilégier des allèles/gènes de résistance qui ralentissent l'évolution vers la virulence sera une avancée majeure pour la durabilité des résistances.

Ces populations à base génétique large seront également un matériel d'étude particulièrement intéressant pour étudier les contraintes génétiques ou physiologiques qu'il faudra gérer dans les schémas de sélection. Mais la mise en place de tels systèmes de

gestion de la diversité *in situ* nécessite de définir les méthodologies de construction et de gestion de ce type de populations et donc d'avoir une plus grande connaissance de la diversité génétique présente dans les collections, de modéliser les risques d'extinction de ces populations et/ou de leur évolution, de définir les effectifs démographiques, la composition initiale des populations, les modalités de migration entre les populations, de contrôler le mode de reproduction...

Piste prioritaire 3 : Ecologie et génétique des interactions bénéfiques à la réaction immunitaire et la résistance et l'infestation

Les interactions entre la plante et les organismes associés, en particulier les microorganismes du sol, mais aussi les interactions entre les plantes d'une même culture (mono ou plurispécifique) peuvent être essentielles en matière de protection des plantes. L'étude et l'optimisation de ces interactions via les leviers génétiques et agronomiques sont des pistes majeures pour un objectif de réduction drastique de l'usage des phytosanitaires.

(i) Les interactions plante/microorganismes du sol. Des travaux récents de la littérature sur la santé des plantes ont démontré la capacité des plantes à recruter des organismes à partir d'un réservoir initial de sol qui sont hébergés au voisinage des plantes, voire à l'intérieur des tissus (endophytes). Un débat subsiste néanmoins dans la littérature scientifique pour identifier si ce sont les facteurs édaphiques ou l'espèce végétale qui conditionne le plus la structure des microbiotes de la plante, en particulier le microbiome des racines (Lareen *et al.* 2016). De plus, le recrutement successif par les plantes d'organismes du sol peut altérer le fonctionnement du sol par sélections successives (Bever *et al.* 2012). Ce phénomène est conceptualisé sous le terme de Plant Soil Feedback (PSF). Les exsudats racinaires étant une source de carbone facilement assimilable, ils sont à l'origine d'une chaîne trophique impliquant des organismes de plus grande taille, pouvant également impacter le sens du PSF et la composition du microbiote racinaire. L'amélioration des plantes est donc questionnée pour créer des variétés susceptibles d'interagir avec la composante biotique du sol à l'échelle du cycle de culture, tout en préservant l'aptitude du sol à préserver un réservoir mobilisable (échelle de la rotation des cultures). Mais ces considérations peuvent être élargies au-delà du microbiote du sol et des interrogations similaires peuvent être posées pour d'autres organismes associés bénéfiques.

(ii) Les interactions plante/plante. La mise en œuvre de la diversification peut s'envisager à l'échelle de la parcelle via l'introduction de diversité génétique (variétés synthétiques, mélanges variétaux) et/ou de diversité spécifique (mélange d'espèces). Cette diversification est un levier très important pour maintenir un réservoir d'organismes bénéfiques pour les cultures mais aussi pour contenir les maladies et ravageurs. En effet, cette diversité ainsi installée opère à l'échelle du champ à travers des phénomènes dit de dilution de l'inoculum, d'effets barrières à la dispersion,... mais aussi à travers des interactions plante-plante qui pourraient directement augmenter la résistance des composantes individuelles des mélanges. Il est donc nécessaire de pouvoir proposer des mélanges d'espèces et ou de variétés permettant d'atteindre les objectifs de rendements pour la culture et de régulation des bioagresseurs, et ces régulations des bioagresseurs devront être étudiés aussi bien à l'échelle parcellaire que paysagère.

Ainsi, comprendre les mécanismes génétiques, physiologiques et écologiques des interactions plantes/organismes associés (du sol) et plante/plante est d'une importance capitale pour relever les challenges de l'amélioration des plantes dont l'objectif est de

développer des variétés optimisant les interactions positives. En Amélioration des plantes, il sera nécessaire d'identifier les traits de plantes susceptibles de diriger la composition et la dynamique du microbiote (plus largement populations d'organismes associés bénéfiques) à différentes échelles spatio-temporelles, de déterminer traits d'interactions des plantes et des valeurs de traits pour optimiser les objectifs des mélanges de variétés/espèces, d'intégrer ces traits d'interaction dans les schémas de sélection et/ou de développer des méthodologies de sélection impliquant la plante et son microbiote (organismes associées).

De plus, dès lors que l'échelle de la rotation des cultures est questionnée, les pratiques culturales et la conception de systèmes de culture doivent être adaptées à ces nouvelles variétés. Une vision plus systémique de l'amélioration et de la création variétale est nécessaire.

Piste prioritaire 4 : Nouveaux traits et plantes de services (couverture en plante compagne, plante rotation...)

L'introduction de plantes de services au sein des agroécosystèmes est un levier important à considérer pour la réduction des intrants phytosanitaires. La fourniture de services de régulation des populations de bioagresseurs, via l'amélioration de nouvelles espèces et/ou la valorisation de certaines caractéristiques d'espèces cultivées actuelles, pourrait permettre d'atteindre les objectifs attendus en termes de réduction de l'utilisation de pesticides. De nombreuses publications et rapports relatent les effets positifs des plantes-compagnes de cultures, des plantes d'interculture (plantes de services dans les rotations) ainsi que des structures dites agroécologiques dans l'agroécosystème, pour la régulation des bioagresseurs. Mais la génétique et l'amélioration des plantes pour ces objectifs sont à développer de façon plus significative.

Les plantes compagnes, via une amélioration de leur capacité à couvrir le sol sans concurrencer (voire faciliter) la culture d'intérêt, sont un réel atout pour la régulation des adventices de cultures mais aussi pour la régulation d'autres bioagresseurs avec lesquelles elles peuvent interagir. Les plantes d'intercultures attendues pour leurs effets bénéfiques sur le sol peuvent aussi avoir une action sur les adventices via notamment leur effet sur la banque de graines, ainsi qu'une action directe sur d'autres bioagresseurs ou leurs prédateurs (auxiliaires de cultures). Les structures agroécologiques (haie, bandes enherbées, fleurie...) quant à elles constituent des sources alimentaires ou d'habitat pour beaucoup d'auxiliaires, prédateurs de bioagresseurs. Le développement de structures variétales adaptées pour ces différents types de plantes de services est un objectif majeur pour compléter le levier agronomique et améliorer la lutte contre les bioagresseurs des cultures.

Les points cruciaux pour atteindre cet objectifs sont (i) comprendre les mécanismes de régulation via l'étude des interactions plante/bioagresseurs, (ii) identifier les niveaux de spécificité génotype/génotype entre la plante et les bioagresseurs, (iii) identifier des traits d'intérêt des plantes, leurs corrélations, leur variabilité et leur déterminisme génétique et physiologique en relation avec les pratiques de gestion appliquées à la culture, (iv) développer des méthodologie de sélection multi-traits pour du multi-services. Les questions soulevées par le développement des plantes de services seront à travailler du niveau du gène à l'écosystème en intégrant les échelles spatio-temporelles (de la parcelle au paysage en passant par le système de culture), en considérant les interactions génétique X environnement, l'environnement incluant explicitement les

pratiques de gestion (date et densité de semis, type de destruction du couvert ou pas, durée de l'interculture selon les cycles des bioagresseurs ciblés....).

En conclusion de l'ensemble de ces perspectives de recherches, il est nécessaire d'ajouter certains points majeurs qui n'ont pas forcément été développés, (i) l'importance de mobiliser **la recherche participative** pour impliquer les différents acteurs (agriculteurs, instituts techniques, conseillers des chambres d'agriculture), vers une co-conception des idéotypes et itinéraires techniques ; (ii) l'importance de favoriser l'interdisciplinarité pour la création variétale afin de pouvoir générer une approche holistique, (iii) la précision ou le débit de **phénotypage** sont des axes à améliorer et la découverte de nouvelles résistances sur certains pathosystèmes nécessite d'appliquer des phénotypages impliquant plus de technologies – Analyses d'images, volumes de plantes phénotypées, avec différents stades phénologiques, sous différents stress abiotiques, mesurant l'évolution des pathogènes ciblés... (iv) la nécessité de travailler aussi aux échelles filière de transformation et de distribution pour lever **les verrous technologiques** ; (v) les **verrous réglementaires**, y compris à l'échelle européenne, pour l'inscription de variétés issues d'édition du génome, de variétés synthétiques pour certaines espèces ou certains cas de mélanges d'espèces et de variétés.

Tableau 1 : Niveaux de connaissances mobilisables et de TRL attendus pour chaque piste prioritaire et type de bioagresseurs concernés.

Priorité	Connaissances mobilisables pour innovation	TRL attendus	Type de bio-agresseurs ciblé
Piste priorité 1	+++	Moyens/élevés	Champignons, Bactéries, virus, insectes, acariens, nématodes
Piste priorité 2	+	Faibles/moyens	Champignons, Bactéries, virus, insectes, acariens, nématodes, mollusques, adventices
Piste priorité 3 (i)	+	Faibles/moyens	Champignons, Bactéries, virus, insectes, acariens, nématodes, mollusques, adventices
Piste priorité 3 (ii)	++	Moyens/élevés	Champignons, Bactéries, virus, insectes, acariens, nématodes, mollusques, adventices
Piste priorité 4	++	Moyens/élevés	Champignons, Bactéries, virus, insectes, acariens, nématodes, mollusques, adventices

3. Objectifs et suggestions de modalités d'actions

Des suggestions d'actions à mener ont été élaborées pour chacune des pistes prioritaires précédemment identifiées.

Piste prioritaire 1 :

Identifier les espèces sur lesquelles l'opérationnalité des sorties pourrait être rapide dans le cadre d'un axe incitatif de type *problem-solving*. C'est-à-dire des espèces pour lesquelles les ressources génétiques sont disponibles et pourraient être caractérisées au regard d'une question phytosanitaire ou parasitaire. Deux catégories d'espèces pourraient être ciblées : (i) espèces d'importance économique connues pour leur consommation en protection phytosanitaire pour pouvoir mesurer les effets du PPR. (ii) espèces plus mineures au plan économique, voire espèces dites « de service » (cf. piste 4), susceptibles d'apporter aussi une diversification des systèmes de production. En ce qui concerne le choix des espèces, une liste consensuelle d'espèces pilotes et de traits ciblés pourrait être proposée par des **groupes de travail associant recherche publique et recherche privée**, mais aussi le réseau des fermes DEPHY. En effet, la question de l'utilisation variétale n'a pas été intégrée dans l'analyse des parcours culturels des fermes DEPHY. Si l'information existe dans le jeu de données disponibles, leur valorisation aidera à orienter le choix des espèces à cibler en priorité dans le PPR et définir l'effet variétal sur les pratiques utilisées.

Mettre en regard le SFS 28 B (Added Value of Genetic Resources) et **faire le recensement des programmes en cours** de type PIA, FSOV, FRSO, Casdar. La convergence d'actions sur les espèces soutenues par ces fonds doit permettre une vision globale nécessaire pour challenger ce qui sera retenu dans le cadre du PPR.

L'appel à projets de la coordination nationale des ressources phylogénétiques pourrait être abondé par des partenariats public/privé plus adaptés dans le cadre du PPR. En effet, la coordination nationale sur la conservation des ressources phylogénétiques des espèces cultivées et leurs apparentées sauvages (hormis les arbres forestiers), mise en place par le Ministère en charge de l'Agriculture lance un appel à projets annuel comprenant un axe caractérisation des collections. Les semenciers, partenaires des 11 réseaux de gestion des ressources génétiques, sont fortement preneurs d'un accès à des accessions déjà caractérisées sur le plan phénotypique et moléculaire. L'absence de moyens discriminants permettant d'optimiser le tri d'un nombre acceptable d'accessions et/ou le risque de sélectionner des accessions inadaptées au screening phénotypique prévu est un facteur dissuasif et limite l'utilisation de ces collections. Ces développements pourraient faire l'objet de travaux à **TRL moyens à élevés**.

S'agissant des **techniques d'édition du génome applicables**, elles pourront être appliquées aux espèces pilotes pour opérer des mutations ciblées sur des gènes identifiés pour la réduction des pesticides et pour lesquels il n'existe pas de diversité génétique suffisante. Pour conduire cette approche dans le pas de temps prévu pour le PPR, ces propositions devront recourir aux techniques d'édition du génome actuellement disponibles. Elles pourraient faire l'objet de travaux à **TRL moyens à élevés**.

Piste prioritaire 2

Les questions et les attentes seront à affiner peut être à l'occasion dans un premier temps, d'un **workshop recherche sur le sujet** avec la présence de compétences en génétique quantitative et génétique des populations, en amélioration des plantes, en biologie évolutive, en épidémiologie et en écophysiologie. Dans un second temps **un séminaire avec les acteurs** puisqu'au-delà des aspects scientifiques à explorer, la mise en œuvre de ce mode de gestion devra être réfléchi afin d'impliquer différents acteurs : les sélectionneurs mais aussi les réseaux d'agriculteurs.

Par ailleurs, nous disposons déjà d'éléments sur le sujet qui pourraient être évalués vis-à-vis de leurs possibilités d'apporter rapidement des solutions notamment pour certains bioagresseurs. En effet, il existe déjà certains dispositifs de gestion dynamique (blé tendre), d'évolution expérimentale, ou de réseaux de variétés gérés à la ferme... Et peut-être nous faudrait-il prévoir **un état des lieux** avec les chercheurs impliqués dans ces dispositifs pour lancer une **évaluation de leur potentiel à être valorisé en termes de transferts opérationnels, transferts qui pourront ensuite éventuellement être conduits**. Cette action pourrait faire l'objet d'un des axes d'un appel à projets à lancer.

Piste prioritaire 3

Les connaissances nécessaires étant encore fragmentaires et atomisées entre différents départements des instituts de recherches et entre instituts, il apparaît nécessaire en premier lieu d'organiser un **workshop** pour rassembler les communautés scientifiques, identifier les fronts de sciences des disciplines et définir les axes pouvant faire l'objet de résultats conduisant rapidement à l'innovation. Ce workshop devra rassembler des biologistes/généticiens, des biostatisticiens afin d'apporter de nouvelles méthodes d'analyses de données sur les systèmes complexes d'interactions en sélection, et des agronomes pour intégrer la conception de systèmes de cultures à base de cultures associées ou compagnes.

La rédaction d'un **appel à projets** ayant deux axes, l'un majoritairement sur les fronts de sciences identifiés et l'autre plutôt *problemsolving* et intégrant les sélectionneurs et les sciences sociales (pour analyser l'adaptation de nouvelles pratiques idoines), serait adaptée.

Piste prioritaire 4

Actuellement l'existence d'une intersection « Plante de Services » du CTPS favorise le développement et l'inscription de variétés de plantes de services et constitue sans aucun doute un atout pour l'implication rapide de la profession et des utilisateurs. Aussi il semble que sur certaines espèces actuellement travaillées, il soit possible de positionner des objectifs opérationnels à court-moyen terme. Mais pour ce faire il est nécessaire que les recherches investissent l'identification des critères de sélection et travaille leur introduction dans les schémas de sélection. Ces propositions pourraient faire l'objet de travaux **à TRL supérieur à 5**. En amont de la mise en place de ces travaux impliquant les différents acteurs, il pourrait être intéressant de programmer un **événement réunissant la profession impliquée dans la création et l'utilisation des variétés de plantes de services, et la recherche** avec l'objectif d'identifier les besoins sur les espèces actuelles pour la mise à disposition de variétés sur le marché. L'identification des participants à cette réunion pourrait se faire en sollicitant certaines associations et le CTPS. Peut-être une enquête préalable serait judicieuse....

Sur de nouvelles espèces, les sorties de l'amélioration des plantes ne peuvent être que sur le moyen-long terme mais nécessitent que nous démarrions rapidement, d'autant que pour certaines des filières commencent à se mettre en place du fait du travail de sélection puis d'inscription au catalogue initié par certains semenciers. Pour ces nouvelles espèces, la programmation d'une part d'un **événement impliquant les acteurs de la création variétale et de la recherche pour identifier les espèces et les besoins** serait judicieux ; et d'autre part la rédaction d'un axe **d'un AAP centré sur la biologie translationnelle** pour faciliter le transfert vers ces nouvelles espèces avec des preuves de concepts.

Par ailleurs, la mise en place d'un **forum libre** et le développement des approches participatives pour la valorisation de nouvelles espèces doivent être considérés. Un **événement réunissant la recherche publique et privée, les acteurs des sciences participatives, les agriculteurs impliqués**, pourrait être envisagé pour avancer sur l'affinage des questions et les actions à conduire dans le domaine.

Enfin, dans le cadre du Contrat de solutions initié par la FNSEA, une soixantaine de solutions à la réduction des pesticides a été identifiée par l'axe Amélioration des plantes, piloté par l'UFS. Certaines de ces solutions sont à des niveaux de TRL bas pour des espèces peu ou pas sélectionnées à ce jour pour leur capacité à être déployée comme plante de service. Un **appel à projets pourrait être lancé en lien avec un usage agronomique** (couverture des sols, rupture des risques parasitaires, alimentation des pollinisateurs, maintien des auxiliaires...). Dans la mesure où on ne recherche pas de caractéristiques alimentaires pour cet usage, la durée du PPR devrait nous mettre en capacité d'amener ces espèces à un niveau agronomique minimum à échéance du PPR.

4.4 Accélérer le développement de solutions de biocontrôle et leur déploiement par l'acquisition de connaissances nouvelles

Thibaut MALAUSA, Camille PROFIZI, Cédric BERTRAND, Frédéric BARRAQUAND

1. Ambition

Le biocontrôle désigne les méthodes de protection des plantes utilisant des organismes (macro-organismes, micro-organismes) ou des substances d'origine animale (métabolites de micro-organismes, phéromones, etc.), végétale (extraits de plantes) ou minérale (soufre par exemple). Ces organismes ou substances peuvent être introduits dans l'agrosystème de façon répétée (sous forme de « produits de biocontrôle ») ou unique (acclimatation d'organismes en vue de leur établissement pérenne), ou encore être résidents (biodiversité locale) et favorisés par des pratiques à l'échelle des parcelles ou des paysages (lutte biologique par conservation).

Le biocontrôle est vu comme un des principaux leviers pour la réduction d'usage des pesticides⁸. Pourtant, force est de constater que l'essor de son utilisation hors des cultures sous serre est trop lent par rapport aux ambitions de réduction d'usage de pesticides fixées par les pouvoirs publics.

⁸ « Pesticides » désigne ici des préparations utilisant des molécules issues de la chimie de synthèse, modifiées (souvent lourdement) par rapport à leurs plus proches homologues naturellement présentes dans l'environnement.

Un des facteurs limitant l'essor du biocontrôle est probablement une inadéquation entre les stratégies de recherche, développement et innovation (R-D-I) et la nature même de l'objet « biocontrôle ». Le biocontrôle est en fait une mosaïque de composantes d'un système agroécologique, dont le succès d'utilisation dépend très majoritairement d'autres composantes (environnement abiotique, structure et composition de l'agrosystème, pratiques agronomiques, caractéristiques des variétés cultivées, agro-équipement utilisé) et qui lui-même peut avoir un effet sur les autres composantes du système. Or, la plupart des actions R-D-I considèrent le biocontrôle dans une logique de substitution (des pesticides) et de développement de produits dans un modèle proche de celui de l'agrochimie où le biocontrôle est traité comme une solution relativement indépendante des autres leviers de la transition écologique.

L'ambition est de produire des connaissances et méthodes d'intérêt pour toute la communauté recherche-développement-innovation (R-D-I) du biocontrôle, permettant aux acteurs qui la composent de monter en puissance en matière de capacité à générer des innovations et assurer leur diffusion. Ces innovations concernent à la fois le biocontrôle sous forme de produits et le biocontrôle reposant sur les services de régulation assurés par la biodiversité résidente qu'il est possible de manipuler par des modifications de pratiques et d'organisation des systèmes de production.

La construction de cette partie s'est basée sur l'analyse des freins et leviers impactant l'essor du biocontrôle. Les actions identifiées comme clés, qu'il s'agisse de recherche, de développement, d'innovation ou de politiques publiques, peuvent être associées à trois objectifs :

- 1. Accélérer et diversifier le développement de méthodes et produits :** de nombreux organismes, substances, modes d'actions ou stratégies de biocontrôle sont actuellement peu ou pas exploités (ou encore à découvrir). Il convient donc de soutenir le développement et la diversification des produits et méthodes. Cet objectif se décline en actions de plusieurs types. Les actions de politique publique : incitation à l'utilisation de pratiques favorisant les services écosystémiques, soutien à l'innovation industrielle, réglementations en faveur de l'accélération de l'utilisation du biocontrôle. Les actions de développement et innovation : conversion de résultats de recherche en développement de méthodes, produits et services. En termes de recherche, les actions portent sur la découverte de nouveaux organismes (et leurs métabolites) et modes d'actions (via notamment l'étude des microbiomes qui ouvrent de nouvelles perspectives en bio contrôle (Massart et al. 2015)), sur les méthodes d'identification et de caractérisation des mécanismes de régulation biologique dans les agrosystèmes les plus résilients face aux bioagresseurs, et sur l'accompagnement de la montée en puissance de méthodes peu ou pas utilisées en Europe (et pourtant à l'origine de success-stories (Borowiec et al. 2018) quand elles le sont) par des recherches en sciences sociales et en écologie.
- 2. Intégrer le levier biocontrôle dans les systèmes de culture :** les méthodes et produits de biocontrôle sont globalement peu utilisés hors des serres. Les régulations biologiques fournies par des organismes de biocontrôle sont quant à elle bien souvent empiriquement mobilisées mais sans être identifiées et généralisées à des systèmes de cultures. Cette situation s'explique par un enchevêtrement de verrous de nature socio-économique et technologique que seule une combinaison cohérente d'actions R-D-I et de politiques publiques pourra faire sauter. En termes de recherche, les questions soulevées sont notamment socio-économiques : quelles stratégies d'innovation, quels modèles économiques et quelles organisations et interactions

entre acteurs favorisent le déploiement et l'utilisation des différents types de biocontrôle ? Elles portent aussi sur la biologie : quels facteurs (a)biotiques conditionnent le succès d'utilisation des organismes et substances ? Elles sont enfin technologiques : quelles technologies pour mesurer les facteurs biotiques et abiotiques qui impactent l'utilisation du biocontrôle ? Quelles technologies de formulation (Vemmer & Patel, 2013) pour faciliter l'utilisation des micro-organismes, médiateurs chimiques et substances naturelles ? Quelles méthodes de modélisation prédictive et règles décision pour l'utilisation du biocontrôle ? Quels équipements pour en faciliter l'application au champ ? Quelles métriques pour objectiver le rôle des régulations de bioagresseurs par des organismes de biocontrôle résidents ?

- 3. Produire des données sur la durabilité du biocontrôle** : une hypothèse implicite motivant l'essor d'utilisation du biocontrôle est que ce dernier présente un niveau de durabilité supérieur à celui des pesticides¹. S'il est globalement admis que l'utilisation d'organismes et substances naturelles engendre de moindres impacts (parce qu'ils n'ont pas fait l'objet de modifications pour les rendre plus biocides ou plus rémanents), une meilleure caractérisation de la durabilité des produits et méthodes de biocontrôle est clé pour démontrer leur intérêt et guider les choix entre voies d'innovation ouvertes au sein du biocontrôle. Or, peu de données sont disponibles : sur les risques et impacts des produits, sur l'empreinte carbone de leur production et utilisation, sur la durabilité de leur efficacité ou sur leur durabilité sociale et économique. L'obtention de ces données est par ailleurs nécessaire pour établir des évaluations multi-critères de durabilité à la base de l'intégration du biocontrôle dans les systèmes de production.

2. Positionnement par rapport à la situation actuelle:

Sur l'objectif « 1. Accélérer et diversifier le développement de méthodes et produits » :

- Le soutien financier à l'innovation industrielle est assuré par le crédit impôt-recherche (pour lequel l'association des industriels du biocontrôle, l'IBMA, demande une augmentation temporaire de taux d'aide pour accélérer l'innovation et attirer les forces R&D sur le territoire) et par les aides de la banque publique d'investissement et du programme d'investissement d'avenir (PIA). Le PPR viserait à catalyser le développement industriel par l'apport de méthodes et savoir-faire mais ne financerait pas directement ce volet.
- La conversion de résultats de recherche en innovations fait l'objet d'une action spécifique dans le cadre de l'axe recherche du plan Ecophyto en cofinancement avec l'ANR : l'appel à projets ANR « Ecophyto Maturation » visant à faire passer des résultats de projets préalablement financés de niveaux TRL 2-4 à des niveaux supérieurs à 5. Le PPR n'apporterait donc pas de soutien financier supplémentaire sur ce volet.
- Le financement du développement agricole est assuré par des mécanismes dédiés (CASDAR notamment). Le PPR pourrait appuyer l'accompagnement de certaines activités de R&D, via des projets de recherche-action, dans les cas où recherche et action sont fortement interdépendants et où la dimension multi-acteurs et l'implication d'acteurs à différents niveaux de la chaîne de valeur est rendue possible par cet accompagnement.

Sur l'objectif « 2. Intégrer le levier biocontrôle dans les systèmes de culture » :

- Le réseau de fermes Dephy et les projets Dephy EXPE offrent une infrastructure de choix pour travailler la question de l'intégration du biocontrôle. Cependant, un atelier de réflexion organisé sur cette question en 2015 a révélé un problème de dialogue entre la R&D sur les produits et méthodes de biocontrôle et la R&D sur l'intégration des leviers dans les systèmes de culture (par des approches de terrain ou de modélisation). Un des points clés soulevé est l'insuffisance des connaissances sur les facteurs de succès d'utilisation du biocontrôle, qui rend difficile ou stérile leur prise en compte dans les approches de conception de systèmes. C'est sur les recherches pouvant faciliter ce dialogue qu'il est proposé que le PPR se focalise.
- De nombreuses initiatives collectives apparaissent localement sur la production « zéro-pesticide ». Elles offrent des opportunités d'accompagnement par la communauté R-D-I, sur des questions de stratégie de création et diffusion des innovations comme sur des questions technologiques de facilitation de l'intégration du biocontrôle.

Sur l'objectif « 3. Produire des données sur la durabilité du biocontrôle » :

- L'axe recherche du plan Ecophyto prévoit un appel à projets en 2019 sur « la durabilité des alternatives aux pesticides », sur un périmètre plus large et non spécifique au biocontrôle. Le PPR pourrait renforcer le volet de production de connaissances et références sur les différents types de critères de durabilité du biocontrôle, et faciliter le dialogue avec les recherches sur l'évaluation multi-critères de systèmes de cultures, qui sont à la base de la conception de systèmes et de l'intégration du biocontrôle dans ces systèmes.

3. Thématiques prioritaires :

1. L'exploration et l'analyse du microbiome des plantes [MT,LT]⁹

L'exploration du microbiome des plantes est considérée unanimement par la communauté R-D-I du biocontrôle comme une source majeure d'innovation. La caractérisation des microorganismes le composant et de leurs interactions est vue comme un vecteur d'identification de nouveaux micro-organismes candidats. La compréhension des mécanismes expliquant ces interactions directes ou indirectes, mobilisant des méthodes de métabolomique et biochimie, est par ailleurs attendue comme un levier de découverte de nouveaux modes d'action qui pourraient ouvrir sur des stratégies de biocontrôle différentes des traditionnelles utilisations d'activité biocide de microorganismes ou de leurs métabolites. Ces stratégies pourraient aller jusqu'à la gestion du microbiome des agrosystèmes, à l'instar de la lutte biologique par conservation jusqu'ici appliquée aux macro-organismes.

Les questions de recherche soulevées sont multiples : quelles méthodes pour inférer les réseaux complexes d'interactions au sein du microbiome ? Comment prendre en compte la diversité des types de micro-organismes ? Quels mécanismes sous-tendent les diverses interactions détectées au sein du microbiome et entre le microbiome et la plante ? Quels modes d'actions pourraient être utilisés en protection des plantes, face aux stress biotiques et abiotiques (exemple des « PGPR ») (Bhattacharyya & Jha. 2012) en

⁹ Pas de temps attendu avant des retombées appliquées : CT = Court-Terme ; MT = moyen-terme ; LT = long-terme

combinaison par exemple avec des variétés catalysant leurs effets) ? Quels déterminants du succès de ces modes d'action ? Comment utiliser au mieux les types de micro-organismes jusque-là peu ou pas utilisés en biocontrôle (comme les phages par exemple) ?

Le PPR pourra s'appuyer sur des collectifs récemment créés sur l'étude du microbiome pour fédérer un réseau capable de porter un ensemble de projets interconnectés, procurant à moyen terme à la communauté française une capacité de prise d'initiative et de coordination au niveau international.

2. La détection et la caractérisation de pratiques et organisations favorisant la prévention et la régulation des attaques de bioagresseurs [MT, LT]

Il apparaît probable que l'essor d'utilisation du biocontrôle soit hautement dépendant de la conception de systèmes de culture basés sur la prophylaxie (plutôt que sur le curatif), pour au moins trois raisons :

- Remplacer quelques pesticides curatifs à large spectre par de multiples méthodes de biocontrôle plus spécifiques serait beaucoup trop coûteux pour les producteurs.
- Le biocontrôle est souvent négativement affecté par l'utilisation d'intrants, notamment chimiques.
- De nombreux modes d'action de biocontrôle ne procurent un service de régulation que lorsque les densités de bioagresseurs sont modérées.

Une priorité de recherche est donc de produire des connaissances qui permettront d'augmenter l'utilisation et le déploiement de méthodes de prophylaxie. Ces méthodes peuvent correspondre à des pratiques agronomiques ou organisations à l'échelle de la parcelle ou du territoire visant à éviter l'établissement ou la dispersion des populations de bioagresseurs (ce qui correspond au défi 2). Elles peuvent aussi s'appuyer sur des mécanismes de régulation procurés par les auxiliaires résidents (ce qui correspond à un mode d'action « biocontrôle » et relève donc du défi 4).

La proposition est de traiter cette priorité sous la forme d'un axe de recherche sur la conception et l'utilisation d'approches de traque à l'innovation, visant à repérer des innovations (techniques ou organisationnelles) conçues localement par des agriculteurs et se traduisant par des effets prophylactiques, d'en caractériser les performances, d'analyser les conditions d'expression de ces performances et de décrire les mécanismes sous-jacents. Ces approches pourraient notamment coupler des recherches en sciences humaines et sociales et des recherches s'appuyant sur le croisement de données sur les pratiques et sur les densités de bioagresseurs, récupérées dans des réseaux de fermes. Cette dernière approche ferait de cette priorité de recherche une ambition partagée entre défis 2, 4, 5 et 6. Ces approches de traque valoriseront par ailleurs les innovations générées par les activités dans les réseaux DEPHY, dans les projets DEPHY EXPE et dans des projets de démonstration d'Integrated Pest Management (projets européens PURE et EUCLID).

3. Déterminants économiques, organisationnels, sociaux, biologiques et technologiques de la diffusion des innovations de biocontrôle [CT à LT]

Le biocontrôle se heurte à des problèmes récurrents de diffusion de l'innovation. Trois questions principales se posent sur ce thème.

La première est comment configurer un environnement économique, social et juridique favorable à la création et à la diffusion de l'innovation en biocontrôle, quel que soit le type de biocontrôle (produits, stratégies de conservation de la biodiversité, etc.) : quels modèles économiques à développer dans le secteur privé pour faciliter l'investissement et le déploiement du biocontrôle ? Quelles innovations réglementaires au niveau national et international ? Quelles politiques publiques pour accompagner l'essor du secteur d'innovation et tous les types de biocontrôle mobilisables ?

La seconde est comment déployer efficacement le biocontrôle dans les systèmes de culture. Généraliser l'utilisation de méthodes et produits requiert une montée en savoir-faire associée à un dialogue intense entre les communautés R-D-I en biocontrôle et en conception/évaluation de systèmes. Ceci se traduit en trois objectifs de recherche à traiter simultanément :

- Concevoir des outils de mesure de paramètres biotiques et abiotiques à prendre en compte pour mieux utiliser les produits.
- Caractériser les déterminants (biologiques, organisationnels, économiques, sociaux) qui impactent le succès d'utilisation du biocontrôle.
- Développer un savoir-faire d'intégration du biocontrôle dans les systèmes de culture, basé sur des méthodes de conception et évaluation de systèmes intégrant ses caractéristiques.

La troisième est d'ordre technologique : quelles avancées de recherche en technologies de formulation, robotique et numérique peuvent faciliter le déploiement du biocontrôle ?

Les trois questions sont pertinentes sur tous les types de biocontrôle. Il est proposé qu'elles soient traitées via des cas d'étude répartis parmi ces derniers. Cependant, un effort particulier de recherche semble particulièrement opportun sur les méthodes actuellement peu ou pas utilisées en Europe. Il s'agit de la technique de l'insecte stérile (ou TIS, qui consiste, chez une espèce ravageur des cultures, à lâcher un grand nombre de mâles d'insectes stériles qui vont rentrer en compétition avec les mâles naturels, perturber la reproduction et ainsi précipiter la chute des densités de populations du ravageur) et de l'acclimatation (qui consiste à introduire de façon pérenne un ennemi naturel d'un ravageur en vue de la régulation à long terme de ses densités de population). Ces méthodes ont donné lieu à des success-stories dans divers pays (dont la France pour l'acclimatation). Pourtant, seule une poignée d'équipes travaille sur ces méthodes en Europe (en France métropolitaine : une équipe en acclimatation et un seul projet en cours de montage sur la TIS). L'essor de ces méthodes à fort potentiel est dépendant d'avancées de la recherche, sur au moins trois fronts. Le premier est celui de la détermination des modèles économiques et organisationnels adaptés à la création et la diffusion de ce type d'innovation. Le second se situe en biologie des populations, car le succès de ces deux méthodes repose sur la prédiction de dynamiques populationnelles influencées par des mécanismes de densité-dépendance positive. Le troisième relève de la biologie évolutive car l'effet des populations introduites (d'auxiliaires dans le cas de l'acclimatation ; de ravageurs stériles dans le cas de la TIS) dépend des caractéristiques de ces dernières, que les méthodes de production de masse sont susceptibles d'impacter fortement. Ce haut niveau d'interdépendance entre développement des méthodes et recherches

l'accompagnant fait de ce thème un choix particulièrement pertinent à traiter par le PPR, avec des retombées appliquées et académiques attendues à l'horizon de 5 ans. L'évaluation des deux méthodes nécessite par ailleurs des suivis de long-terme, que le pas de temps proposé par le PPR est particulièrement adapté pour initier.

Ce thème prioritaire 3 pourra capitaliser sur des projets européens récemment coordonnés par les équipes françaises :

- Le projet EUCLID, qui a apporté des preuves de concept de terrain sur l'utilisation de stratégies de lutte biologique par conservation, via une collaboration Europe-Chine.
- Le projet COLBICS, qui a porté sur l'amélioration du savoir-faire de l'industrie sur la production et l'utilisation de macro-organismes de biocontrôle.
- Le projet REVOLINC, sur l'amélioration et le déploiement des TIS, principalement contre les vecteurs de maladies humaines mais abordant également le contexte agricole.
- Le projet BIOMODICS, sur les déterminants écologiques du succès d'utilisation des auxiliaires dans les programmes d'acclimatation.

4. Suggestions de modalités d'actions

Deux dispositifs de financement d'actions sur les thèmes prioritaires susmentionnés sont proposés, avec comme cahier des charges pour chacun de tirer le meilleur de la programmation de longue durée permise par le PPR et de faciliter la portabilité de l'action vers des programmes européens :

1. Le premier dispositif est un appel à « réseaux-projets ». Ces « réseaux-projets » seraient des groupes d'équipes, publiques et/ou privées, qui s'engageront sur un plan d'action à moyen-terme (8 ans). L'intérêt de ce dispositif est de tirer le meilleur des réseaux R-D-I : favoriser leur montage qui débouche sur une grande richesse d'idées, assurer leur financement en mode projet pour mettre en pratique de façon dynamique ces idées (ce qui n'est souvent pas permis par les appels à projets finançant sur des pas de temps courts), assurer une continuité des activités R-D-I sur un pas de temps significatif, et permettre une prise de risque accrue.

Chaque réseau devrait reposer sur une masse critique de personnes fortement mobilisées et pourrait être fortement polarisé (un pôle massif central et un réseau de satellites) ou au contraire déconcentré (réseau d'équipes de taille similaire répartis sur le territoire).

Chaque réseau mènerait un plan d'action sur 8 ans, qui serait financé sur un format 2 x 4 ans, afin notamment de faciliter la production de données de **suivis de long-terme**. La contractualisation porterait sur deux enveloppes flexibles : personnel et fonctionnement. Une étape feu vert / feu rouge (Go / NoGo) serait prévue à mi-parcours.

L'appel à « réseaux-projets » pourrait être lancé en première année, en deux étapes séparées par une animation de co-construction.

Deux types de « réseaux-projets » pourraient être considérés.

Les « Réseaux-projets recherche », dont le plan d'action comportera avant tout des livrables « recherches » (production de résultats, « position papers », revues de littérature) tout en configurant le réseau (partenariats, axes de recherches, modèles d'étude) pour maximiser les déclinaisons en matière de développement et innovation.

Des réseaux-projets recherche semblent particulièrement pertinents pour structurer les recherches sur (i) le microbiome des plantes (priorité thématique #1), (ii) la caractérisation des environnements socio-économiques favorisant l'innovation et la diffusion de l'innovation sur les différents types de biocontrôle (priorité thématique #3) et les technologies de formulation (priorité thématique #3).

Les « Réseaux-projets recherche-action », dont le plan d'action comporterait à la fois des jalons et livrables « recherche » (production de résultats, « position papers », revues de littérature) et « innovation » (preuves de concept labo et terrain, inventions, démonstrations au terrain). Ces réseaux sont particulièrement pertinents lorsqu'il y a forte interdépendance entre recherche et action pour progresser dans un thème prioritaire. C'est le cas sur (i) le thème prioritaire #2 qui pourrait faire l'objet d'un seul large réseau-projet de détection et caractérisation des innovations de type prophylaxie/prévention, se déclinant via plusieurs approches complémentaires (sciences humaines, technologies d'acquisition et analyse de données, écologie), (ii) le thème prioritaire #3 dans lequel plusieurs réseaux pourraient étudier les déterminants de succès ou échec de l'utilisation du biocontrôle et de sa diffusion en accompagnant l'essor de quelques exemples emblématiques de biocontrôle à fort potentiel, dont les TIS et l'acclimatation qui pourraient être traitées dans un même réseau du fait de leur connexion à de mêmes questionnements de recherche académique en sciences humaines et en écologie.

2. Un appel à projets de 2 à 4 ans, répété les deux premières années de vie du PPR, sur les actions suivantes dont l'objectif serait d'apporter des résultats, méthodes et outils relativement rapidement, pour les mobiliser notamment dans les réseaux-projets :
 - Mettre au point des outils pour expérimenter sur le biocontrôle (depuis les connaissances sous-jacentes et jusqu'aux premières preuves de concept (priorité thématique #4): méthodes de détection des organismes de l'agrosystème, capteurs pour détecter ou quantifier des volatiles (phéromones, kairomones), outils moléculaires de suivi des dynamiques des micro-organismes bénéfiques et pathogènes, outils de suivi de l'état physiologique des plantes (état de stress, sensibilité, résistance, réceptivité aux stimulateurs, etc.), etc.
 - Produire des revues de littérature et « evidence books » sur les trois thèmes prioritaires.

Pour éviter la dispersion des moyens, il est proposé de concentrer un maximum de moyens sur un nombre réduit de systèmes de culture.

Partenariats possibles

Thème	Action	Partenaire	Commentaire
Microbiome et biocontrôle	AAP Réseaux-projets	Consortium biocontrôle	Environ 500 K€ (dont 250 K€ engagés en 2019). Réponse de principe du PPR souhaitable avant l'AG du consortium (11/12/2018)
Pratiques et organisation favorisant les régulations biologiques	AAP Réseaux-projets	Institut Convergence Digitag ?	Via défi 5 ?
Déterminants de la diffusion des innovations	AAP Réseaux-projets	IDEX UCA-JEDI (Université Côte d'Azur)	Cofinancement évoqué avec la gouvernance de l'IDEX. A discuter
		Industriels du biocontrôle	Discussions préparatoires engagées. Engagement à discuter au moment des montages de projets.
	AAP Projets	Consortium biocontrôle	500 K€ (dont 250 K€ en 2019), sur des recherches précompétitives préalables au développement d'outils de mesure pour l'expérimentation et le positionnement des produits de biocontrôle

4.5 Mobiliser l'agriculture numérique et les agroéquipements pour l'agroécologie et la réduction de l'usage des pesticides

Xavier REBOUD, Frédéric LEBEAU, Thomas WATTEYNE

1 Ambition :

Le numérique et les agroéquipements seront les moyens concrets par lesquels les systèmes agroécologiques sans pesticides pourront être déployés.

Ils le seront de manière directe parce qu'ils permettent la réalisation concrète de l'action ou parce qu'ils apportent l'information qui permet de moduler dans le temps ou l'espace la manière de piloter la conduite de la culture ou de l'élevage.

Ils le seront de manière indirecte s'ils sont en mesure de rendre qualifiable, quantifiable ou certifiable le bon fonctionnement de l'agroécosystème dans les différentes dimensions de la durabilité. De telles informations, si elles sont disponibles, viendraient nécessairement alimenter les cahiers des charges et servir de support pour marquer une différenciation portée par les filières jusqu'aux consommateurs.

Enfin, le numérique dans sa version de traitement de données massives (*'big data'*) peut permettre l'émergence de stratégies collectives partagées dans une dimension de bien commun. Ce champ encore balbutiant reste largement à investir.

Le numérique et les agroéquipements sont déjà entrés dans cette mouvance car la technologie est très présente et l'agriculture numérique en plein essor. Toutefois il reste

des marges assez importantes à couvrir pour en faire des supports à la hauteur des enjeux. En effet, les agroéquipements sont envisagés dans une perspective d'agriculture de précision, certes sobre dans l'utilisation des ressources au plus juste mais en restant dans la logique et la continuité d'une agriculture intensive actuelle, normalisante, curative, artificialisée par les intrants, en somme très peu orientée pour tirer explicitement profit des propriétés biologiques potentiellement présentes dans l'agroécosystème.

Assez largement porté par un foisonnement de startup, l'agriculture numérique est traduite par des offres de services dans un modèle encore très orienté pour servir l'individu plus que le collectif et pour appuyer des économies d'intrants plus que pour qualifier des dimensions jusqu'ici peu prises en considération car sans effet économique à court terme (raison de marché) et/ou sans métrique de mesure évidente (raison technologique). Nous pensons que l'absence d'intérêt économique immédiat ou évident a pu contribuer à inhiber les développements technologiques.

Or, piloter des systèmes agricoles sans pesticides avec l'agroécologie comme principe sera nécessairement gourmand en technologies numériques et en agroéquipements dédiés car de manière raccourcie on peut résumer cela à : « *il faut savoir tout, sur tout et tout le temps* » : « **tout** » car l'agroécologie s'insérant dans une logique de durabilité étend les critères à prendre en considération pour juger des performances selon les trois piliers économique, environnemental, social auxquels on peut même adjoindre explicitement le pilier santé si on envisage les retombées de la sortie des pesticides ; « **sur tout** » car l'agroécologie s'inscrit dans une logique large de système avec des boucles longues et des effets différés (ce sont les échelles larges d'espace et de temps) mais aussi avec une traque à la cohérence du système afin de garantir sa robustesse : ce sont les interactions positives entre pratiques (échelle de la parcelle), entre ateliers (échelle de l'exploitation), voire en lien avec les atouts du paysage (échelle des territoires). A chacun de ces niveaux (ultra-local pour permettre l'interaction, parcelle, exploitation, paysage) la biodiversité peut et doit être mobilisée, ce qui nécessite de pouvoir à *minima* la caractériser. Il y a actuellement très peu de métriques qui fassent consensus pour rendre compte de cette richesse biologique (Noos, 1990). Une illustration est donnée avec le compartiment sol pour lequel, on veut à la fois que sa gestion facilite le contrôle des adventices, qu'il soit vivant et sain (i.e. absence d'inoculum infectieux de pathogènes telluriques), qu'il stocke du carbone mais dans le même temps libère progressivement les éléments utiles de fertilisation, qu'il participe à purifier l'eau à l'échelle d'un bassin versant, qu'il réduise la taille des inoculum infectieux de pathogènes aériens pendant toute l'année et particulièrement en amont des saisons culturales. Cette multifonctionnalité des sols est, à juste titre, un pilier de l'agroécologie quand dans le même temps on peine à le caractériser, à le suivre en continu, à moduler les actions pour le protéger (Kirk et al. 2004 ; Ge et al. 2011). La biodiversité hébergée sera idéalement qualifiée pour les propriétés fonctionnelles qu'elle apporte (microflore fixatrice, nitrifiante ou dénitrifiante, régulatrice, épuratrice, etc.) ; et enfin, « **tout le temps** » car l'agroécologie repose sur la réalisation de processus biologiques par essence d'ordre dynamique. On suit des flux de matière et d'énergie, on évalue les changements d'état des stocks plus que l'on utilise des valeurs absolues : '*stocke-t-on ou déstocke-t-on*' plutôt que '*y-at-il de la matière organique*' ? '*Les populations de bioagresseurs explosent-elles ou régressent-elles*', plutôt que '*sont-elles au-dessus ou en deçà d'un seuil fixé de manière quelque peu arbitraire*' (car indépendamment des situations locales) ?

Ainsi l'ambition que peuvent porter le numérique et les agroéquipements pour l'agroécologie sont à la fois d'une ampleur démesurée et d'une réalité évidente. C'est la

capacité même de pouvoir apporter une mesure selon une métrique pertinente (mais dont le calcul peut être complexe) qui rend la grandeur visible et mobilisable. Quand les capacités sont techniquement limitées, on se cantonne à instaurer des obligations de moyens (cf. la réglementation sur les CIPANs). Quand nos capacités vont au-delà en ouvrant sur une quantification qui fait sens, la porte s'ouvre pour instaurer des obligations de résultat mais aussi pour autoriser la modulation des actions qui tiennent compte de cette hétérogénéité (Oerke et al. 2010). L'hétérogénéité devient ainsi une dimension pilotable sur laquelle la biodiversité viendra généralement se caler.

On l'aura compris : sans le numérique, sans des équipements sophistiqués, sans la capacité de modulation, d'automatisation, on ne pourra déployer qu'une petite fraction de ce que l'agroécologie peut apporter. Vouloir se passer des pesticides, c'est être en mesure de faire prospérer l'agroécosystème dans la gamme des situations qu'il peut supporter (notion de '*normal range*', cf. aussi les travaux en écologie théorique de 'métabolisme de l'écosystème' à décliner ici à un agroécosystème dont on exporte une fraction sous forme de denrées agricoles (Conway, 1985 ; Gliessman, 2000 ; Brown et al. 2004 ; Allen & Gillooly 2009). Pour se passer des pesticides qui sont actuellement les garants de l'efficacité des mesures curatives (comme des médicaments pour un malade), l'accent que le numérique et la technologie doivent porter est nécessairement orienté vers la caractérisation du risque épidémiologique (Sankaran et al. 2010), le suivi de la santé des cultures (ou des animaux) dans la durée, l'insertion des stratégies individuelles dans une stratégie collective réfléchie, le suivi du bon fonctionnement des fonctionnalités biologiques et enfin, la traçabilité des pratiques dans l'optique de certification et, plus généralement, de démonstration de la portée des actions préventives. Ce sont tout particulièrement ces axes que l'on va détailler dans le positionnement des actions.

Une facette très complémentaire d'apport du numérique et des agroéquipements consistera à monter des prototypes de dispositifs permettant de piloter une biodiversité démultipliée sans pour autant (trop) compromettre la mission première de production.

2 Positionnement

Actuellement, on peut dire que les agriculteurs sont globalement peu outillés pour évaluer le degré de fonctionnement agroécologique de leur exploitation, de leur parcelle ou de leur sol. En effet, la quasi-totalité des métriques de pilotage se concentrent sur des données physiques ou chimiques, essentiellement d'ordre climatique. Le potentiel de fonctionnalité biologique n'est qualifié que dans des expérimentations dédiées sans ouvrir sur des outils de pilotage mis à disposition des acteurs.

Une conséquence de cette pauvreté des indicateurs utilisables est largement perceptible dans la difficulté à laquelle on fait face quand il s'agit d'évaluer la performance des actions prophylactiques. Tout au mieux font-elles partie des '**bonnes pratiques**' sans que l'on sache si elles seront suffisantes, pourquoi elles fonctionnent et si on peut amplifier leur efficacité à travers des mesures renforçantes. Une traduction de cette faiblesse à rendre compte du préventif quand le curatif marche bien et qu'il est réglementairement cadré s'exprime dans la manière dont les bulletins de santé du végétal rendent compte du risque phytosanitaire. Si les messages d'alerte pour tel ou tel risque dans telle ou telle culture s'appuient sur des observations de terrain et de la modélisation, il reste encore rarissime que le message module le risque selon une autre grandeur que les conditions climatiques. Vous ne verrez pas de message dire que si l'agriculteur a pratiqué des faux semis, le risque est réduit ; que s'il observe plus de trois familles d'auxiliaires alors sans doute les régulations naturelles seront-elles en mesure de juguler une épidémie ; que si les

conditions hydriques sont limitantes alors intervenir risque de limiter le potentiel futur du sol à couvrir les besoins nutritionnels, etc. Ce faisant, on entretient le sentiment que le préventif n'est jamais suffisamment efficace, sans distinction réelle entre les situations où cela est sûrement vrai et les situations où les impasses seraient non seulement possibles mais souhaitables. La future séparation du conseil et de la vente vient renforcer la nécessité d'outiller les acteurs pour suivre les dynamiques locales et appuyer leur décision par des jalons mobilisables pour le pilotage tactique (en saison) et stratégique (à l'échelle de la rotation ou de l'assolement).

L'objectif poursuivi est de faire évoluer les technologies agricoles, tant agroéquipements que capteurs, outils d'aide à la décision et outils numériques pour porter les pratiques et principes de l'agroécologie notamment en appuyant toute la démarche qui va permettre leur qualification. A cette fin, il peut être porteur d'identifier et de lever les impasses techniques actuelles pour rendre visibles des grandeurs associées à la durabilité, la sobriété et la robustesse des systèmes de cultures pratiqués, pour qualifier la performance non seulement économique mais aussi sociale et environnementale.

3 Thématiques prioritaires

Ces quelques thématiques ont été retenue parce **qu'elles ouvrent le chemin vers des ruptures**. Si on doit n'en retenir qu'une, on privilégiera ce qui peut permettre **une épidémiosurveillance généralisée, au service de tous et incarnée dans une dimension de processus dynamique** ou les trajectoires démographiques peuvent être infléchies car modulées par les connaissances que l'on en a. Le choix de ce thème permet en effet de venir qualifier les trois autres thématiques en montrant combien ils procurent un cadre préventif mobilisable dans une gamme étendue de situations agropédoclimatiques et de risques à couvrir.

3.1 Elaborer une épidémiosurveillance 2.0 pour tous et intégrée à l'échelle des territoires et des saisons.

Fédérer les acteurs de la recherche sur les dispositifs technologiques d'une épidémiosurveillance réalisée en continu donc incluant explicitement les phases amont prévisionnelles comme l'analyse post épidémie pour savoir ce qui s'est réellement passé. L'idée que l'épidémiosurveillance puisse, d'une part, être mise dans la main des acteurs eux-mêmes et que d'autre part, elle soit utilisée comme relevant d'un processus dynamique de suivi démographique des bioagresseurs et des auxiliaires avec des incidences sur la santé des cultures, ouvre des perspectives très innovantes. Outre la capacité à mieux anticiper les crises en disposant plus précocement de signaux faibles avec la généralisation des mesures, le fait même de concevoir l'épidémiosurveillance comme une trajectoire dynamique que l'on peut infléchir ouvrira la possibilité de qualifier la portée (robustesse et répétabilité) compte tenu de ce qui a été fait ou pas ainsi que des actions prophylactiques prises (Boissard et al. 2008). Actuellement il reste rarissime que les bulletins d'alerte phytosanitaire modulent la prévision sur autre chose qu'une base climatique ; ce faisant, ils font fit de tout ce que l'agriculteur a pu mettre en place pour s'en prémunir comme modifier son assolement, choisir autrement ses variétés, modifier les périodes d'intervention, etc. Bref, tout se passe comme si l'effet des mesures prophylactiques restait négligeable ! Une plateforme technologique d'épidémiosurveillance pourrait, à terme, être missionnée en vue d'identifier les défis, de partager des outils de développement, de développer des outils logiciels et matériels, de travailler sur la qualification et la certification, de promouvoir la standardisation quand elle est nécessaire et enfin développer la formation et la dissémination. Pour rester dans

le concret et le timing de ce programme, l'idée défendue est de faire travailler les équipes à travers des appels d'offre de type Challenge (pour la mise au point des métriques) ou « problem solving » (pour la présentation d'une épidémiosurveillance sous le format d'un processus dynamique à infléchir). Les financements viendraient donc soutenir les équipes dans trois actions complémentaires et leur couplage explicite :

- la mise au point de capteurs mesurant si possible de manière directe, non destructive, en continu la présence de populations de bioagresseurs. Globalement on manque de capteurs automatisés pouvant rendre compte de la présence avérée ou pas d'un pathogène, de la présence d'auxiliaires, de la fonctionnalité potentielle des régulations biologiques naturelles. (dans le pire des cas, cette ignorance conduit à ce que l'agriculteur traite et fasse disparaître la trace d'une situation favorable). Les stratégies de contrôle s'avèrent souvent plus efficaces si elles sont prises précocement mais l'évaluation de leur efficacité ou positionnement optimal butte sur la difficulté de détecter les phases initiales d'épidémies quand il y a encore peu de signaux.
- les formats de mise en réseau des observations et d'interprétation à la fois pour étendre les modèles prévisionnels mais aussi pour rendre compte des échelles au-delà de la parcelle. Des dispositifs d'épidémiosurveillance ont historiquement été mis en place en vue d'évaluer les risques sanitaires lorsque leur pertinence a été étayée par un besoin généré par exemple lors d'une crise. Par ailleurs, d'autres dispositifs sont développés en vue de limiter l'usage des produits phytopharmaceutiques en lutte intégrée. Certains dispositifs sont publics, d'autres privés ce qui multiplie les sources d'information. De nombreux obstacles se dressent sur la route d'une épidémiosurveillance généralisée et reposant sur le plein potentiel des nouvelles technologies; collecte, stockage, propriété, partage, traitement et utilisation de l'information. Il convient d'analyser les blocages de diverses natures et les pistes pour les surmonter. Il s'agit après avoir développé des capteurs originaux de nature optique, chimique, physique ou biologique facilitant la reconnaissance précoce des pathogènes de développer les réseaux et modalités organisationnelles permettant de les déployer à l'échelle territoriale.
- L'identification des variables venant moduler l'impact des épidémies ceci dans l'objectif de qualifier la valeur des mesures préventives sur la base d'une quantification factuelle de l'existence de périmètres indemnes ou peu touchés au sein même de foyers généralisés. Les pratiques agroécologiques visent à maintenir sous un certain seuil épidémique la pression des bioagresseurs. Il faudra donc disposer de métriques permettant de renforcer la reconnaissance et la visibilité des bénéfices des mesures prophylactiques proposées par l'agro-écologie et plus largement de suivre les trajectoires suivies par les épidémies avant mais aussi après atteinte du seuil. Ce sont les situations qui ressortent indemnes épargnées alors que le seuil épidémique est atteint qui présentent le plus d'intérêt... L'épidémiosurveillance s'est progressivement construite autour de deux piliers complémentaires : la modélisation et les observations de terrain. Le numérique est mobilisé dans la collecte d'observations précoces, la modélisation prédictive, l'usage des données agro-météorologiques, l'exploitation des données collectées. Il convient de renforcer l'expertise collective sur les développements tant logiciels que matériels spécifiques à l'épidémiosurveillance en vue de faciliter la qualification des meilleures pratiques. Il est relativement facile de trouver des prévisions mais très difficile de disposer d'informations sur ce qui s'est réellement

déroulé. Il existe bien quelques analyses dans les expertises émises dans les bulletins d'alerte mais cela n'est qu'exceptionnellement soutenu par une information étayée. Il faut attendre les bilans de campagne pour disposer d'une analyse globale de l'intensité des risques encourus et des conséquences éventuelles. On butte très rapidement sur l'incapacité de pouvoir distinguer les cas où inférer qu'il ne s'est rien passé parce que les gens ont massivement fait ce qu'il fallait pour infléchir la situation qui aurait sinon dégénéré avec des impacts néfastes, des cas de l'alternative où l'alerte était finalement infondée. Enfin, l'analyse de risque met peu en avant les interactions biologiques et régulations afférentes. Il existe par conséquent un manque d'outil de qualification et naturellement de certification de la pertinence des dispositifs d'épidémiosurveillance.

La capacité de la contribution des scientifiques à couvrir les différentes étapes : capter la donnée, traiter pour représenter, transformer pour rendre exploitable et revenir sur les conditions entourant un succès, seront assez décisives.

3.2 Des agroéquipements de pilotage des peuplements hétérogènes à forte diversité fonctionnelle. (thématique inter-défis)

Sur un site dédié, les équipes seraient missionnées pour monter et exploiter une plateforme technologique couvrant la chaîne permettant de réaliser, piloter et valoriser un peuplement plurispécifique. Les éléments à maîtriser allient préparation des parcelles pour des semis éventuellement décalés, récolte sélective et tri post récolte. On peut y ajouter tous les éléments de description du peuplement végétal, qui selon le degré de précision maîtrisé, peuvent conduire à des interventions différenciées ciblées : électrocuter une adventice, retirer un organe malade, aspirer des colonies de pucerons, déplacer des auxiliaires depuis des populations réservoirs jusqu'au lieu de leur mobilisation. Cela peut se faire pour les besoins de l'expérimentation sous serre avec des outils pilotes se déplaçant sur une grille fixe au-dessus de la végétation avant de tenter une généralisation en parcelle ouverte et dans des conditions environnementales potentiellement plus difficiles (vent, pluie, pente).

3.3 Des solutions pour le pilotage des actions de biocontrôle (thématique inter-défis).

Porter le développement de techniques d'application innovantes d'agents de bio-contrôle, par le développement d'une communauté de recherche venant en appui au développement des produits de bio-contrôle en vue de réduire l'écart entre efficacité au laboratoire du biocontrôle et de la lutte biologique. Les agents de biocontrôle se distinguent par une diversité de formes supérieure à celles des agents chimiques, depuis des substances volatiles à des macroorganismes vivants en passant par toutes les tailles d'organismes vivants ou diverses formes d'extraits d'origine biologique. En conséquence les techniques d'application requises nécessaires présentent un plus large spectre. Sur la base d'une cartographie des spécificités et contraintes existantes identifiées (forme physique, viabilité,..) il serait possible d'extraire des invariants génériques pour proposer des techniques d'application adaptées aux diverses natures de vecteurs : diffuseur générique universel de volatils sous forme d'aérosol ou de vapeur, cocons synthétiques normés pour l'application de macroorganismes (Metcalf & Metcalf, 1992) à l'aide de machines spécifiques (i.e. distributeurs rétrofités sur des rampes de pulvérisation, drones, ...). Une action normative précoce avec l'industrie émergente pourrait aider à lever des verrous de diffusion et faciliter l'émergence d'entreprises technologiques focalisées sur les techniques d'application spécifiques. Cette inflexion pour favoriser

l'émergence du domaine technique pourrait mobiliser des compétences historiquement focalisées sur l'application des produits de synthèse (notamment au sein d'Irstea). Il s'agirait de développer les techniques et dispositifs d'essais permettant d'évaluer l'efficacité des techniques d'application en conditions contrôlées permettant de faciliter le passage du laboratoire à l'échelle du champ en évitant les aléas expérimentaux du terrain et de faire émerger des plateformes d'essai dédiées aux spécificités de ces expérimentations. Les contraintes environnementales sont intuitivement plus contraignantes pour les solutions de biocontrôle, elles offrent en conséquence une marge de progrès importante via la conception de dispositifs sensibles aux conditions environnementales en vue de cibler leur utilisation dans l'environnement au moment le plus opportun. Elles présentent donc le potentiel d'un couplage avec des dispositifs d'épidémiosurveillance, de mesure de paramètres agro-climatiques, de période du cycle, de direction et force du vent, etc. Ces pistes pourraient être rapidement explorées sur base de produits déjà commercialisés en collaboration avec les acteurs établis du secteur tout en mobilisant également les innovations récentes des laboratoires de recherche.

3.4 Couvrir le secteur de la certification des pratiques et de la réalité du fonctionnement biologique avec des outils et capteurs dédiés. (Thématique inter défis)

Disposer des traceurs des pratiques en vue d'appuyer une certification d'une absence de recours aux pesticides afin de permettre la certification des performances et/ou des moyens mis en œuvre permettrait d'ouvrir la voie à la prise en compte de critères étendus de performance, valorisables dans le cadre des circuits courts, des labels et des démarches ouvrant droit à des aides conditionnelles. La fiabilité de la mesure peut faire la distinction entre une obligation de moyen et une obligation de résultat et permettre de moduler l'aide aux caractéristiques des situations localement rencontrées. Il s'agirait ainsi de : développer les méthodologies et indicateurs permettant de suivre le fonctionnement biologique de l'agroécosystème en vue d'assurer son suivi, son optimisation et éventuellement faciliter la prise de décision de l'agriculteur ; développer les métriques spécifiques à des couverts complexes ; faciliter l'échange d'information entre les agriculteurs ; documenter les acquis d'expérience ; faciliter l'enregistrement et la traçabilité des services écosystémiques rendus par la mise en œuvre des pratiques agroécologiques en vue de faciliter la différenciation des produits.

4 Suggestions de modalités d'actions

4.1 Un « challenge » pour des capteurs biologiques inscrits dans une épidémiosurveillance balayant de l'observation à sa valorisation comme un processus dynamique pilotable dans le temps.

On l'a vu, derrière l'ambition de soutenir le développement de l'agroécologie, il y a une difficulté majeure à savoir tout sur tous les organismes et tout le temps donc il y a là l'expression d'une **ambition majeure de haut débit, de réduction des coûts, d'automatisation**. Le challenge scientifique consiste à mesurer et piloter la prophylaxie sur un temps long en travaillant sur la gestion des trajectoires des épidémies et des régulations biologiques qui les cadrent (état des populations auxiliaires, par ex., réalité de la prédation, impact des changements d'état du milieu, etc.). La dimension haut débit au service des acteurs (signaux précoces) et aussi pour l'alimentation des collectifs (notion de bien commun) soulève la question de la collecte (de la propriété), du stockage, de la standardisation en vue du traitement, du traitement lui-même et de la forme de rendu sur les données.

Un challenge pour des communautés scientifiques peut cibler l'objectif de rendre compte du biologique avec des capteurs dédiés et d'articuler cela dans une démarche territoriale en lien avec les acteurs actifs à cette échelle (coopératives, regroupements d'agriculteurs, filières appellations, services publics, bassins d'alimentation territoriale, agences de l'eau). Un indicateur de capitalisation d'avancée serait la capacité à intégrer quelques mesures préventives dans la modulation des messages de risque dans les BSV. Equilibrer l'effort consenti en mettant autant d'effort dans la capture de l'info (avec de nouveaux outils) que dans la chaîne de son interprétation (là aussi avec des outils dédiés à cet objectif). Le caractère disruptif à cultiver est de basculer sur un processus dynamique qui permette de faire progresser le préventif (signaux précoces) mais aussi de qualifier ce qui fait qu'il apporte ce que l'on en attend (« le risque était avéré et les conséquences restent limitées »).

Le risque scientifique à maîtriser réside dans le fait que l'on peut décrire très finement sans pour autant accroître la capacité à intervenir et infléchir : 'connaître ne veut pas dire maîtriser'. On aurait alors une épidémiologie 2.0 automatisée et généralisée, donc sans doute unitairement moins chère mais globalement plus chère du fait de la multiplication des mesures sans en retirer des bénéfices en termes d'ouverture de nouveaux moyens de pilotage ou de caractérisation de la portée des actions préventives prises dans l'optique de leur généralisation. Il y aura donc un point d'attention tout particulier à porter sur la notion d'articulation des pratiques agricoles à leur effet direct et différé sur la biodiversité hébergée.

Mots clés : capteurs biologiques, haut débit, collecte et interprétation, cartographie spatialisée, trajectoire des épidémies dans le temps, rendre compte pour le risque épidémique du contraste prévu -réalisé.

4.2 Un ou des UMT pour des partenariats thématiques, locaux et explicitement organisés autour d'une mission finalisée.

Il y a un réel challenge à (re)lancer une dynamique, y compris industrielle, qui puisse mobiliser les compétences des établissements publics scientifiques et technologiques. On peut en attendre un savoir-faire partagé portant sur le développement de solutions technologiques, leur mise en œuvre sur le terrain et leur intégration dans un système de culture innovant et une logique de filière qui s'appuie plus explicitement sur ce changement de paradigme. Ce chaînage pourrait se faire à petite échelle pour concentrer les compétences dans des infrastructures de type « living lab » ou plus simplement en lançant des UMTs missionnées explicitement sur ce thème (et pouvant associer des chambres d'agriculture pour favoriser la déclinaison territoriale et la cohérence d'une filière locale de valorisation, notamment en appui des schémas territoriaux d'alimentation).

Nous proposons qu'un UMT ou son équivalent soit missionné sur une des actions 3.2, 3.3 ou 3.4 présentées ci-dessus. En effet, sans unité de lieu et dispositif expérimental dédié, il est actuellement difficile d'imaginer que cela puisse se faire via des appels à consortium pour une durée limitée. Si c'est l'option qui devait être retenue, il faudrait réévaluer (à la baisse) les ambitions pour ne retenir qu'un nombre limité d'aspects et d'attendus.

4.6 Encourager le changement en mobilisant les leviers économiques et réglementaires, privés et publics.

Marion DESQUILBET, Pierre LABARTHE, Philippe VISSAC

1. Ambition

Les pesticides ont permis des bénéfices privés pour le secteur agricole (augmentation de la production, diminution des coûts de production, diminution des risques économiques sur la production), se répercutant aux consommateurs par des baisses de prix des produits. Cependant, ils génèrent des dommages pour la santé et l'environnement, qui renforcent l'intérêt de développer des alternatives aux pesticides, qui bénéficieront à l'ensemble de la société. Or, au cours du temps, divers facteurs ont contribué à un auto-renforcement de la supériorité économique des pesticides par rapport à leurs alternatives (Cowan & Gunby, 1996; Wilson & Tisdell, 2001; Vanloqueren & Baret, 2008) : compatibilité avec les changements de capital fixe (par exemple agrandissement des exploitations, équipement agricole adapté à l'agriculture intensive et réduction de la diversité des pratiques) ; effets de réseau (notamment spécialisation des cultures enlevant des débouchés locaux à des agriculteurs pour des cultures plus diversifiées, effets d'apprentissage) ; effets de dépendance au sentier (David, 1985) dans les possibilités d'innovation ; persistance des politiques publiques, c'est-à-dire tendance au maintien de leur *statu quo* même lorsqu'elles ne sont plus justifiées, qui se traduit par une prise en compte insuffisante des effets négatifs des pesticides sur la santé et l'environnement.

Dans une situation marquée par de tels facteurs d'auto-renforcement, la transition vers des technologies plus respectueuses de la santé et de l'environnement nécessite de mobiliser plusieurs leviers. Cowan et Hultén (1996) en identifient plusieurs : changements de politiques publiques ; avancées scientifiques permettant des ruptures technologiques ; changements de goûts et de préférences des consommateurs réorientant la production vers des technologies plus écologiques ; développement de marchés de niche favorisant l'apprentissage et les économies d'échelle ; renforcement des liens entre recherche académique et recherche pratique, non seulement pour produire des connaissances sur les alternatives écologiques pour et avec leurs utilisateurs, mais également pour apporter les preuves des effets négatifs des technologies dominantes sur l'environnement et la santé.

Ces différents éléments suggèrent des leviers de transition et dessinent des enjeux pour des recherches, en sciences sociales et au-delà, sur la réduction de l'utilisation des pesticides.

- Une première ambition est de mieux connaître les coûts induits par l'utilisation des pesticides du fait de leurs effets sur la santé ou sur l'environnement. Les connaissances (notamment en épidémiologie) sur l'exposition des travailleurs agricoles aux

pesticides et les maladies professionnelles qui en découlent peuvent jouer un rôle déterminant dans la sensibilisation des utilisateurs aux risques associés aux pesticides, et contribuer à réduire leur utilisation. Les recherches en sciences sociales peuvent être mobilisées pour identifier et aider à lever les obstacles à la connaissance de ces coûts humains et environnementaux.

- Un deuxième enjeu est celui de mieux comprendre l'articulation entre les multiples politiques publiques pouvant avoir des effets sur l'utilisation des pesticides en agriculture, dans leurs dimensions réglementaires, incitatives, et de soutien à l'action collective, ainsi que leur rôle dans le renforcement décrit plus haut. Cet enjeu nécessite de déployer des analyses tant qualitatives que quantitatives qui doivent permettre de dessiner les schémas de causalité de ces politiques, appréhender les formes de soutien relatif (incitations/désincitations) qu'elles procurent à différents modèles d'agriculture plus ou moins utilisateurs de pesticides, évaluer leurs impacts et proposer des alternatives.
- Un troisième enjeu renvoie aux multiples formes privées de régulation du monde agricole. Si la transition technologique peut être tirée par de nouvelles relations entre production et consommation, il apparaît nécessaire de mieux comprendre le rôle des différents acteurs des filières et des territoires dans ces relations, et notamment des acteurs intermédiaires et des collectifs d'agriculteurs, des industriels produisant les pesticides, des machines et des capteurs ou encore des collectifs de citoyens. Par ailleurs, certains acteurs de l'aval sont à l'initiative de nouveaux labels indiquant des formes réduites d'utilisation de pesticides ou de changements dans les exigences en termes de traitements phytosanitaires dans les contrats avec les agriculteurs. Il est important d'évaluer le degré et les modalités de réduction d'usage des pesticides permis par ces stratégies, ainsi que leur cohérence avec une réduction au sens large des impacts sanitaires et environnementaux de l'agriculture et de l'alimentation. Il est également important d'étudier comment les politiques publiques (telles que par exemple la normalisation, les labels publics ou les règles encadrant les labels privés) interagissent avec les stratégies des acteurs privés.
- Le quatrième enjeu porte sur la production et l'utilisation de connaissances sur les différentes technologies alternatives existantes ou à venir. D'une part il est nécessaire de mieux comprendre comment les modalités de production de connaissances jouent sur les changements de pratiques des agriculteurs réduisant l'utilisation de pesticides. D'autre part, il faut analyser comment les grandes transformations en cours de l'agriculture jouent sur les mécanismes de production de connaissances (développement de l'agriculture biologique, digitalisation et transformation de la R&D agricole, séparation accrue entre capital et travail...). Par ailleurs, une forme de production de connaissances consiste en des démarches participatives accompagnant les acteurs dans des transitions agroécologiques basées sur la reconception de leurs systèmes de production. Ces démarches doivent faire l'objet de recherches.

2. Positionnement par rapport à la situation actuelle et priorités pour le PPR

Cette section présente quatre priorités thématiques associées aux enjeux de recherche présentés ci-dessus.

2.1. Mieux connaître les coûts cachés des pesticides —et les coûts d'acquisition de connaissances à leur sujet— pour aider à réduire leur utilisation

Les dommages des pesticides pour la santé et l'environnement, parfois appelés « coûts cachés » des pesticides, concernent le secteur agricole en général, et ses travailleurs en particulier par des expositions en premier lieu par voie cutanée. Ainsi, les données épidémiologiques, bien qu'encore très incomplètes, mettent en évidence une sur-incidence de certaines pathologies chroniques (cancers du sang, de la prostate, maladie de Parkinson) parmi la main d'œuvre agricole exposée aux pesticides, et ont conduit à la création récente de deux tableaux de maladies professionnelles du régime agricole (tableau 58 sur la maladie de Parkinson provoquée par les pesticides en 2012 et tableau 59 sur les hémopathies malines provoquées par les pesticides en 2015). Il en résulte des coûts pour la santé de ces travailleurs qui sont à la fois privés (c'est-à-dire supportés directement par chaque utilisateur) et publics (via le financement de la sécurité sociale) et qui appellent à des réglementations en termes de prévention et d'information. Par ailleurs, les pesticides peuvent diminuer les services rendus par les écosystèmes pour la production agricole (pollinisation, contrôle biologique des bioagresseurs, purification de l'eau, régulation locale du climat, fertilité des sols par exemple). Ils peuvent également provoquer d'autres dommages, qui affectent les hommes et les écosystèmes en dehors de l'agriculture (effets sur la santé des riverains de l'agriculture par la pollution de l'air, ou sur la santé de la population générale à cause des résidus de pesticides dans l'alimentation ou dans l'eau ; atteintes à la biodiversité et aux écosystèmes du fait de la pollution de l'eau, de l'air, des sols par les pesticides). Ces effets sur la santé et l'environnement sont des externalités, qui affectent d'autres personnes que les utilisateurs de pesticides. Leur existence appelle à des interventions publiques pour corriger les incitations à utiliser des pesticides.

Un premier objectif pour la recherche est de mieux connaître l'ampleur de ces coûts cachés, pour éclairer les choix des décideurs publics visant à les éviter, et, au-delà, pour aider la transition en favorisant la prise de conscience à leur sujet. Cette ampleur est difficile à évaluer, d'une part parce que les effets sur la santé et les coûts associés sont imparfaitement documentés, d'autre part parce qu'il est difficile de tracer la source des effets documentés, qui peuvent être différés et peuvent résulter d'un cumul entre des facteurs déclenchants multiples. De plus, les effets peuvent affecter des générations futures et les populations d'autres pays. Il est donc également important de mieux appréhender les conditions d'une amélioration des connaissances sur ces coûts cachés. En effet, l'acquisition d'informations permettant de mieux les connaître est elle-même coûteuse, ce qui limite les possibilités d'améliorer cette information et pose la question du niveau de preuve et de risque à partir duquel il est raisonnable de prendre des décisions.

Les questions de recherche sur l'évaluation des coûts cachés concernent des disciplines telles que l'épidémiologie, la toxicologie, l'écologie, l'écotoxicologie notamment, pour améliorer les connaissances sur les impacts des pesticides sur la santé humaine et les autres êtres vivants, l'ergonomie afin de mieux comprendre l'exposition des travailleurs agricoles en situation réelle de travail, l'économie de la santé qui traite des coûts de prise en charge de diverses pathologies pour divers groupes de population, la sociologie qui étudie la construction sociale de l'ignorance et les phénomènes de mise en visibilité ou d'invisibilisation. Il est également nécessaire de poursuivre des recherches en sciences humaines et sociales pour comprendre les nouvelles formes d'organisation du travail

dans et entre exploitations agricoles, et leurs conséquences sur les populations concernées par les situations d'exposition (développement de la sous-traitance, recours accru au travail saisonnier). La question de l'exposition aux pesticides renvoie enfin à celle des relations entre preuves scientifiques et décision publique. Cette question a différentes dimensions : techniques (sur les coûts d'acquisition des preuves et les niveaux de preuves pouvant soutenir la décision), éthiques (questions de la valeur de la vie humaine et de la justice environnementale), et démocratiques (comment favoriser l'accès à ces preuves pour différents groupes sociaux). Elle peut également être un levier de transition, en renforçant les outils à disposition de l'éducation ou du conseil : la démonstration concrète des situations d'exposition peut induire des changements de pratiques chez les utilisateurs de pesticides.

La question des risques sanitaires et de l'exposition des travailleurs agricoles est un sujet de recherche émergent aux échelles européenne et française (cf. Action Cost européen H2020 Sacurima, TIGA Nouvelle Aquitaine sur la viticulture durable et la sortie des pesticides, (APR Anses SocioAgriPest ...). De manière plus générale, les aspects méthodologiques concernant l'évaluation des coûts de la pollution sont abordés dans le projet ANR GREEN-econ. Dans le cas des pesticides, cette thématique se heurte à des difficultés de disponibilité de données et de méthodologies sur lesquelles il est nécessaire d'investir (cf. action d'animation proposée à la fin du document) en associant différentes disciplines.

2.2. Mieux comprendre l'articulation entre les politiques publiques pour changer les incitations/désincitations à utiliser des pesticides qui en découlent

Un vaste ensemble de politiques publiques encadre ou contraint l'utilisation des pesticides et peut donc permettre de réduire ces coûts cachés. Les politiques publiques concernées peuvent être ciblées directement sur l'utilisation des pesticides ou l'exposition aux pesticides (procédures d'autorisations de mise sur le marché des pesticides ; taxe sur les pesticides ; certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques ; prévention des expositions des travailleurs agricoles ; protection de la qualité de l'eau et de l'air ; politiques d'information ou de « nudges » visant à orienter l'utilisation de pesticides par les agriculteurs ; règles concernant l'utilisation des pesticides dans les cahiers des charges des standards publics de qualité, qu'il s'agisse de ceux qui portent une forte ambition environnementale comme l'agriculture biologique ou la Haute Valeur Environnementale, ou des autres signes de qualité qui pourraient renforcer les contraintes environnementales de leurs cahiers des charges). Elles peuvent jouer plus indirectement sur l'utilisation des pesticides (règles de la Politique Agricole Commune et modalités de leur mise en œuvre nationale et politiques régionales et infrarégionales sur l'agriculture ; fiscalité agricole ; assurance agricole ; politiques alimentaires, à toutes les échelles territoriales, avec par exemple les règles sur la restauration collective, l'encouragement à l'approvisionnement des cantines scolaires en produits biologiques ou à la diversification alimentaire, l'éducation alimentaire, les projets alimentaires territoriaux, qui sont de plus en plus clairement identifiées comme essentielles à des changements de modèle agricole ; orientation des crédits impôt-recherche ; politiques de recherche, de soutien à l'innovation et à l'action collective, à l'éducation, à la formation et au conseil ; règles sur la séparation du conseil et de la vente ; politiques de soutien à la biodiversité ; soutien public à des dispositifs d'épidémiologie).

Ces différentes politiques publiques font jusqu'ici l'objet d'une attention inégale de la part des chercheurs en sciences sociales, avec des études académiques qui sont souvent

centrées sur une politique particulière et ne permettent pas toujours de déterminer les ordres de grandeur des effets incitatifs ou désincitatifs de ces différentes politiques. Un enjeu pour la recherche est donc de mieux évaluer les effets respectifs de ces différentes politiques sur les niveaux relatifs de soutien reçus par différents modes d'agriculture plus ou moins utilisateurs de pesticides, sur leurs coûts et leurs profitabilités, sur le comportement des agriculteurs en matière de pesticides et sur les dommages créés par les pesticides, avec une prise en compte plus fine des pratiques agricoles, telles que la diversification des cultures, les pratiques de travail du sol ou la mise en place de couverts végétaux. Il importe également de mieux comprendre l'articulation de ces politiques, ainsi que les manières dont elles pourraient être adaptées pour inciter à réduire les dommages des pesticides, les freins à ces changements et les moyens de les lever.

Parmi ces politiques, une attention particulière pourrait être portée aux procédures d'autorisation de mise sur le marché des pesticides et aux procédures de suivi ex-post des éventuels effets négatifs de ces produits. Ces procédures sont au cœur de nombreuses critiques de la société civile, mais elles ont fait l'objet de peu de recherches dédiées jusqu'ici en sciences sociales, notamment en économie où les recherches sur la réglementation des risques chimiques demeurent peu nombreuses. De plus, cette réglementation, ciblée sur les produits phytopharmaceutiques eux-mêmes, n'a pas été pensée pour prendre en compte, d'une part, la diversité des pratiques et itinéraires techniques qui relèvent de l'agroécologie et d'autre part, des produits innovants qui répondent aux caractéristiques des pesticides, mais aussi des fertilisants par exemple. Les principes et fondements juridiques de ces réglementations pourraient être repensés au regard des nouveaux enjeux en termes de productions agricoles, de santé humaine et d'environnement. Un deuxième axe pourrait porter sur les réformes possibles de la PAC, politique globale très structurante, pour mieux l'aligner avec la réduction de l'utilisation de pesticides. Un troisième axe d'investigation pourrait concerner l'effet des nouvelles formes de soutien public à l'innovation et aux alternatives technologiques (sélection variétale, biocontrôle, agroéquipement) et agronomiques (reconception des systèmes de production, gestion de la diversité variétale et culturelle à des échelles paysagères). Différents outils ont été conçus depuis une dizaine d'années aux niveaux européen (PEI-Agri...) et français (réseau Déphy, GIEE) pour accompagner les agriculteurs via la production et l'échange de connaissances sur les systèmes de production permettant une réduction des pesticides ou via la constitution de réseaux d'innovation multi-acteurs. Des études sont nécessaires pour mieux comprendre les apprentissages permis par ces politiques, mais aussi leurs effets distributifs (qui sont les agriculteurs bénéficiaires et non bénéficiaires de ces politiques ?) et leur impact. Enfin, un quatrième axe pourra se centrer sur les leviers d'action à l'échelle des territoires. En effet, les décisions des agriculteurs et leurs choix de modes de culture individuels plus ou moins utilisateurs de pesticides sont fonction des incitations à une organisation spatiale des cultures influençant les dynamiques d'évolution des bioagresseurs.

Un enjeu est également de contribuer aux débats sur les effets d'une écologisation de l'agriculture, marqués par des craintes selon lesquelles l'amélioration sanitaire et environnementale permise par une réduction de l'utilisation de pesticides au seul niveau français, voire au seul niveau européen, pourrait créer des distorsions de concurrence entre pays ou régions du monde, en raison d'un dumping environnemental de la part de pays « havres de pollution », ayant une législation moins forte par rapport aux pesticides. Cependant, la perte de compétitivité des pays soumis à des politiques plus strictes quant à l'utilisation de pesticides pourrait être atténuée (voire renversée) par la promotion

d'innovations réduisant à terme les coûts. Ces innovations dans de nouvelles technologies plus efficaces pourraient être soutenues par le marché, via une valorisation par des signes de qualité reconnus par les consommateurs ou par un développement des circuits courts et locaux de commercialisation. De plus, dans un secteur soutenu comme l'agriculture, des réorientations des politiques, agricoles et au-delà, peuvent contribuer à améliorer la compétitivité de filières ayant peu ou n'ayant pas recours aux pesticides, un sujet jusqu'ici peu étudié dans la littérature. Des études empiriques sur l'existence et l'ampleur d'effets d'innovation conduisant à des prises de leadership technologique, selon les modalités de changement des politiques publiques, permettraient d'étayer le débat public autour de cette question des distorsions de concurrence.

Cet enjeu peut s'appuyer sur des communautés scientifiques mobilisables dont les projets en cours ne traitent cependant pas nécessairement de front la question des pesticides. Ainsi, il existe actuellement des travaux cherchant à mieux comprendre les conceptions des politiques publiques (H2020 Pegasus) et leurs effets relatifs d'incitation ou de désincitation à l'agroécologie (ANR IDAE). D'autres évaluent l'impact de politiques publiques sur l'adoption de pratiques écologiques (H2020 LIFT), dont certaines axées sur la réduction de l'utilisation de pesticides (ANR PENSEE).

2.3. Mieux connaître les changements à l'œuvre des formes de régulation privée de l'utilisation de pesticides pour comprendre les leviers qui en découlent

Les possibilités de transition vers une réduction de l'utilisation des pesticides dépendent des choix et stratégies économiques de différents acteurs, au-delà des seuls agriculteurs. Les réseaux de relations entre ces acteurs, et les institutions qui les régulent, jouent sur les capacités à écologiser les pratiques mises en œuvre sur les exploitations. Un enjeu de recherche est donc de mettre à jour ces formes de régulation privée, leurs transformations en cours, leurs impacts sur les incitations à réduire les utilisations de pesticides, et les modalités d'action publique susceptibles de les influencer. Ces recherches contribueront aussi à l'identification de leviers d'action collective, à l'échelle des territoires et des filières, pour soutenir le développement d'alternatives aux pesticides, voire la reconception de systèmes agro-alimentaires.

Par exemple, et de façon non exhaustive, en amont de l'agriculture, les acteurs industriels de la production de pesticides (ou d'équipements permettant leur épandage), qui ont un intérêt direct à la vente de pesticides, peuvent être à l'origine de formes de résistance au mouvement de réduction des pesticides (incluant des actions visant à limiter les évolutions réglementaires ou des actions de communication), mais également d'adaptation selon leurs stratégies d'innovation et d'investissement en R&D. L'ampleur de ce mouvement dépendra de leur redéploiement industriel vers des alternatives aux pesticides, telles que le biocontrôle, et de l'émergence de nouveaux acteurs sur les marchés des substituts aux pesticides comme ceux répondant à la définition des substances de base (Règlement (CE) 1107/2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques), libres d'AMM et de droits de propriété industrielle par exemple.

Au niveau de la production agricole, les représentations collectives des agriculteurs, sous forme syndicale ou associative, peuvent être porteuses de changements de pratiques pour une défense de la santé des travailleurs agricoles. Différentes formes d'organisation collective du travail peuvent aider à faire face aux surcoûts liés à l'utilisation de pratiques alternatives aux pesticides. Des partages d'expérience d'agriculteurs ayant réussi à réduire leur utilisation de pesticides peuvent permettre une diffusion de leurs pratiques

à d'autres agriculteurs. Pour les acteurs intermédiaires tels que les coopératives et les négociants, des modèles économiques sont à construire pour accompagner les nouvelles exigences de séparation entre vente de produits phytosanitaires et conseil, et la baisse de chiffre d'affaire associé à la diminution des ventes de pesticides. Les possibilités de diversification des cultures, qui sont un levier important de réduction des pesticides, dépendront des réorganisations logistiques de ces acteurs, renvoyant à des enjeux de coordination à l'échelle des territoires et des acteurs.

En aval de l'agriculture, les acteurs de la transformation et de la distribution peuvent proposer la mise en place de standards volontaires ou de contrats spécifiques intégrant des critères sur les itinéraires techniques mis en œuvre dans les exploitations auxquelles ils achètent des produits agricoles. La grande distribution est en effet poussée dans ce sens par un contexte marqué à la fois par une pression des organisations non gouvernementales et par une demande accrue des consommateurs pour des produits alimentaires sans pesticides. Ce mouvement est accéléré par les nouvelles modalités de traçabilité des informations permises par les technologies numériques. Il est important d'évaluer les contenus et la mise en œuvre de ces standards et contrats de droit privé (avec l'amont, l'aval, les divers prestataires de service) et leur interaction avec les politiques publiques. En effet, les exigences des acheteurs, qu'elles soient contractualisées ou non, exercent des contraintes fortes sur les itinéraires techniques possibles, donc sur les possibilités d'en changer. Il est également nécessaire de comprendre dans quelle mesure les nouvelles formes privées ou associatives de systèmes locaux d'alimentation qui se mettent en place dans les territoires (AMAP et circuits courts, approvisionnement des cantines professionnelles) peuvent jouer sur les pratiques des agriculteurs et la réduction des pesticides. Quant aux citoyens, parfois organisés en associations, ils peuvent mobiliser différents leviers d'actions (alliance avec des agriculteurs, recours juridiques, contestation, campagnes de communication) pour peser sur l'utilisation de pesticides.

Ce défi peut s'appuyer sur des initiatives déjà lancées, dans le cadre de projets pluridisciplinaires (H2020 LegValue, ANR Wheatamix et Sustain'Apple, projet métaprogramme Smach BUGS...) qui cherchent à analyser comment les stratégies d'acteurs ou les configurations de filières ou de territoires facilitent ou limitent le développement d'alternatives écologiques.

2.4. Comprendre la production et l'utilisation de connaissances associées au développement des technologies alternatives pour encourager la transition

Le développement et l'adoption de technologies alternatives dépendent aussi des connaissances disponibles à leur sujet, et de leur utilisation : connaissances sur leur efficacité, mais également connaissances sur leur mise en pratique, qui peut parfois induire une reconception des systèmes de production des agriculteurs.

Une première question est de comprendre comment les modalités de production de connaissances jouent sur les changements de pratiques des agriculteurs réduisant l'utilisation de pesticides. Il serait par exemple intéressant d'évaluer dans quelle mesure le développement de l'agriculture biologique peut conduire à des échanges de connaissances entre agriculteurs conventionnels et biologiques sur des alternatives aux pesticides. Un autre thème d'intérêt porte sur les effets du numérique, qui selon ses modalités de déploiement, pourrait permettre d'augmenter les informations à disposition des agriculteurs et leurs réseaux pour mieux ajuster leurs pratiques aux milieux, ou au contraire renforcer les pratiques d'utilisation des pesticides en automatisant certaines

décisions. Enfin, les nouvelles relations entre capital et travail au sein des exploitations agricoles peuvent avoir des conséquences sur la personne à l'origine de la prise de décision concernant les pratiques de protection des cultures ou des animaux. Cette personne peut être un agriculteur, un manager employé ou un sous-traitant, ce qui peut avoir des conséquences sur la volonté de réduire ou non l'utilisation des pesticides.

Une deuxième question est celle de l'évolution du financement et de l'organisation de la R&D et du conseil agricoles, de manière à évaluer la capacité de ces services à produire des connaissances robustes et pertinentes pour accompagner les agriculteurs dans des trajectoires de réduction des pesticides. Ces services de conseil et de R&D sont actuellement transformés par des nouveaux modes de financements et de mise en œuvre des services (généralisation des partenariats public-privé...), dans un contexte de digitalisation.

Un troisième axe de recherche concerne les démarches de recherche participative qui sont susceptibles d'accompagner les transitions, en permettant de développer, avec les praticiens, des alternatives à l'utilisation de pesticides, dans une vision systémique. L'objectif visé est d'accompagner des agriculteurs dans des démarches de reconception agroécologique de leurs systèmes de production. Ce type de recherche permet donc d'accompagner concrètement des agriculteurs dans des trajectoires durables de réduction des pesticides. Elle peut également produire des connaissances plus génériques, notamment sur la compréhension des formes d'apprentissage et des nouveaux réseaux des agriculteurs, dans un contexte de digitalisation. Ces connaissances peuvent à leur tour être opérationnalisés dans des réflexions sur les nouveaux rôles et les nouvelles compétences d'acteurs intermédiaires au sein du système d'innovation agricole (conseiller agricoles, facilitateurs, courtiers en connaissances...), mais aussi sur leurs modèles économiques, ainsi que sur les formes d'intervention publique les plus efficaces pour les soutenir.

Des chercheurs français contribuent à la structuration de recherches sur les transformations des sources d'information et des modalités de décision des agriculteurs vis-à-vis d'innovations environnementales (FP7 Solinsa, H2020 AgriLink). Il existe par ailleurs des initiatives de recherches participatives autour de projets de collectifs d'agriculteurs développant des alternatives écologiques (semences paysannes, systèmes d'élevage autonomes...).

3. Suggestions de modalités d'actions

Sur le défi 6, nous proposons de lancer un AAP « front de science », qui regrouperait, sans les prioriser ou hiérarchiser, les quatre enjeux de recherche présentés ci-dessus.

Nous proposons par ailleurs l'organisation d'une animation scientifique sous la forme d'un séminaire international, dont la thématique est décrite ci-dessous.

Proposition d'animation scientifique. Organisation d'une rencontre entre acteurs scientifiques autour de la mesure des coûts cachés des pesticides pour la santé des travailleurs agricoles

Concernant l'amélioration des connaissances sur les coûts cachés des pesticides, une priorité serait un échange sur les points de blocage liés aux données disponibles entre différents scientifiques ayant déjà travaillé sur ce sujet. Notamment, au niveau français, deux initiatives séparées, qui ont lieu récemment à ce sujet, ont chacune rencontré des

difficultés en termes de disponibilité des données et de méthodologie pour mesurer la fraction de risque attribuable¹⁰, à savoir

- un travail du Centre International de Recherche sur le Cancer sur les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France métropolitaine¹¹,
- un travail de l'Inspection Générale des Finances, de l'Inspection Générale des Affaires Sociales et du Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et des espaces ruraux, visant à étudier la faisabilité de la création d'un fonds d'aide aux victimes de produits phytopharmaceutiques¹².

Pour identifier ce que ces travaux ont pu étudier, les limites sur lesquelles ils ont achoppé, les possibilités d'avancer sur cette question de « l'excès de malades dus aux pesticides », les limites des données existantes et les données supplémentaires qui permettraient d'améliorer les connaissances, il est proposé de faire se rencontrer et débattre

- les personnes ayant participé à ces deux initiatives récentes ;
- des acteurs ciblés générateurs de données sur les deux composantes de la fraction de risque attribuable, à savoir des épidémiologistes qui fournissent des données pour les valeurs de risque (personnes travaillant sur les cohortes Pelagie ou Agrican) et des personnes ayant des connaissances sur les fréquences d'exposition en agriculture avec un recul historique (par exemple données BNV-D pour les pathologies à court terme ; autres données à mobiliser peut-être via le ministère de l'agriculture pour des pathologies à plus long terme) ;
- des chercheurs en sciences sociales ayant travaillé sur les questions de processus d'invisibilisation de la santé au travail dans le cas des pesticides, autour des questions de prise en compte de la main d'œuvre saisonnière et des travailleurs contractuels des entreprises de travaux agricoles dans les données utilisées ;
- des collègues européens spécialistes de ces différentes questions

¹⁰ La fraction de risque attribuable est la proportion de malades qui le sont à cause de l'exposition ciblée. Pour la calculer, deux composantes sont nécessaires :

- la fréquence d'exposition, globalement ou molécule par molécule, dans la population agricole (c'est-à-dire, qui est exposé) ; or, on manque de données pour la calculer et on fait face à énormément d'incertitudes à son sujet (notamment molécule par molécule et si on veut des données remontant dans le passé) ;
- la valeur du risque mesurée dans les études épidémiologiques (c'est à dire, de combien quelqu'un qui est exposé augmente son risque) ; or on fait également face à beaucoup d'incertitudes dessus (et ici aussi, plus on veut remonter dans le passé, plus c'est compliqué).

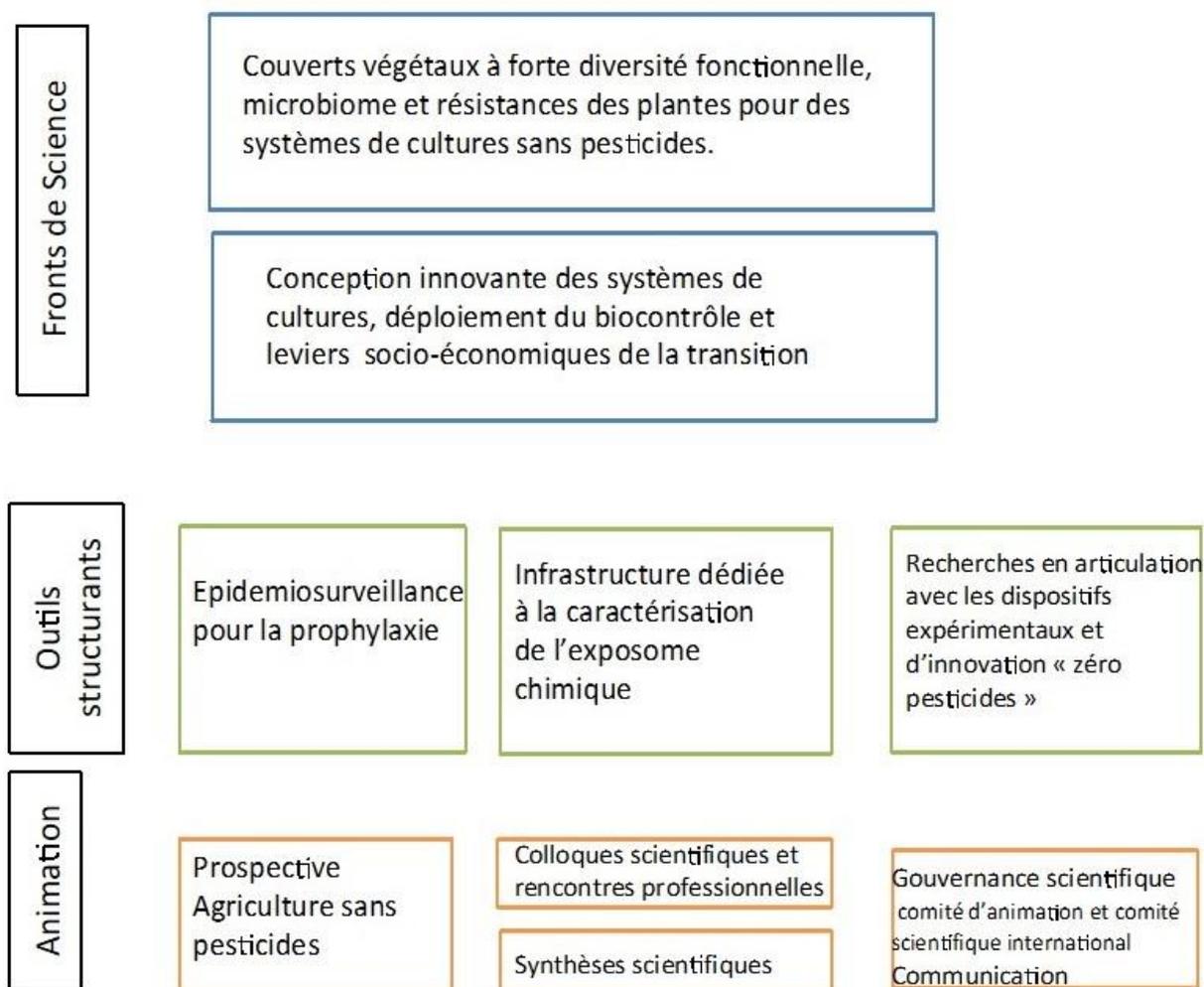
¹¹ http://gco.iarc.fr/includes/PAF/PAF_FR_report.pdf

¹² <http://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/2017-M-043-03-DEF.pdf>

5. Priorités proposées pour le PPR

A partir des questions identifiées dans l'analyse précédente, un certain nombre de priorités ont été identifiées. En regard de ces priorités, des montants budgétaires indicatifs ont été mentionnés.

Trois types d'actions sont envisagés dont plusieurs pourraient trouver leur place dans un appel à projets présentant plusieurs axes : 1) des actions d'animation : prospective, colloques, rencontres scientifiques-acteurs professionnels, synthèses et communication, 2) des axes « front de science », 3) des axes « outils structurants ».



5.1. Animation scientifique

Action pilotée par l'INRA.

L'animation du PPR est une partie du programme qui va au-delà du simple pilotage scientifique des appels à projets qui seront lancés. Il s'agit en effet de prendre appui sur le PPR pour mobiliser une large communauté d'acteurs nationaux et internationaux dans une réflexion dynamique sur les thématiques du PPR, afin de co-porter des thématiques partagées, à l'échelle nationale et internationale, au sein des communautés scientifiques et de la recherche-développement et avec les acteurs socio-économiques. C'est la raison pour laquelle un certain nombre d'activités d'études, de prospective et d'organisation de colloques et de rencontres de terrain sont proposées ici.

5.1.1. Gouvernance générale

Il est proposé que la coordination scientifique soit assurée par l'Inra en liaison avec le secteur scientifique « agriculture » de l'établissement. Un appui technique en secrétariat devra être organisé et soutenu, pour mettre en œuvre toute l'activité d'animation proposée ci-dessous et d'assurer la communication (création d'un site web dédié, etc.) autour de ce programme prioritaire de recherche à forte ambition.

L'animation scientifique du PPR durant toute sa durée serait confiée à un comité d'animation dont les compétences des membres seront proches de celles des 18 personnes qui ont été associés à la construction de cette proposition (voir liste en page 2). A l'occasion de la constitution de ce comité, l'introduction de nouveaux champs disciplinaires pourra être envisagée.

Ce comité sera chargé des actions d'animation et sera mobilisé en tant que de besoin pour assister le MESRI, le SGPI et l'ANR pour la préparation d'un appel à projets.

En lien étroit avec l'ANR qui serait en charge de lancer et de gérer les AAP compétitifs, et pour la conduite du futur PPR, ce comité serait chargé d'élaborer les documents de programmation, d'organiser les actions d'animation, de proposer les appels à projets à lancer.

Il est proposé qu'un Conseil d'Orientation Scientifique (COS) et un Comité Scientifique International (CSI), ou Scientific Advisory Board (SAB) soient créés. Le COS sera composé des représentants des principaux établissements de recherche publique concernés par le PPR et des représentants des acteurs économiques. Il aura un rôle de consolidation de l'orientation scientifique du PPR.

Le Conseil Scientifique International aura un avis consultatif en contribuant à l'identification des thèmes et actions prioritaires sur les fronts de science les plus ambitieux, en bénéficiant de l'éclairage international. Il comprendra des chercheurs français et européens et assurera la visibilité internationale du PPR et son articulation avec les initiatives et dispositifs internationaux, mais aussi avec des initiatives en cours dans différents pays, en Europe et à l'international. Il sera mobilisé également dans les phases de réflexion prospective (étude Prospective, colloques scientifiques internationaux). Il sera présidé par un chercheur étranger (cf. infra).

Le mode de désignation de ces comités, leur composition seront définies par le MESRI et le SGPI. Ils pourraient se réunir une fois par an.

5.1.2. Prospective « Agriculture européenne sans pesticides »

Une prospective « Agriculture européenne sans pesticides » sera lancée. Elle jouera un rôle de structuration des réflexions et d'animation au sein du PPR, par la participation des porteurs de projets à l'élaboration des scénarios. Elle sera également alimentée, en particulier pour la construction de scénarios, par les travaux de synthèse scientifique effectués dans le cadre du PPR. Elle sera l'occasion de mesurer les effets attendus des différents leviers scientifiques explorés dans le PPR et d'analyser les trajectoires de transformation de l'agriculture européenne vers des systèmes sans pesticides à l'horizon 2050.

Par l'élaboration de visions communes, la prospective permettra de créer un espace de discussion et de coordination entre les recherches conduites au sein du PPR. Les principales hypothèses de transformation identifiées dans les scénarios permettront de circonscrire un ensemble de questions de recherche mises en regard des travaux menés dans le PPR.

De manière générale, la prospective devra répondre à trois grands objectifs :

- Construire des scénarios viables d'agriculture sans pesticide ;
- Identifier les conditions nécessaires aux transitions techniques et sociologiques vers une agriculture sans pesticides : préciser les freins et les leviers pour atteindre le(s) scénario(s) ;
- Évaluer par une analyse multicritères, issue d'un travail de simulation (modèle mondial), les différents scénarios d'une agriculture sans pesticides (santé, environnement, GES, Biodiversité, économie)

La méthode comprend les étapes suivantes

1. Définition du système correspondant à la prospective « une agriculture sans pesticides » et de l'horizon de l'étude
2. Analyse rétrospective de l'évolution des différentes dimensions du système (ex. changement climatique, biodiversité et relations à l'environnement, systèmes de culture, changement des structures agricoles, chaînes de valeur et styles de consommations), et des jeux d'acteurs.

L'analyse rétrospective est la base du raisonnement prospectif. Son objectif est de fabriquer une base de connaissances sur les tendances passées du système pour comprendre la dynamique passée sur lequel on veut agir. Il s'agit d'identifier les tendances lourdes, les effets de lock-in, les signaux faibles ou les germes de changement, et les ruptures possibles à long terme (ex. changement climatique et développement d'espèces invasives).

3. Élaboration de scénarios à 2050 présentant différents systèmes d'agriculture sans pesticides aux niveaux européen et mondial

La construction des scénarios se réalise dans une démarche de *backcasting* qui mobilise un tableau morphologique (matrice détaillant les dimensions du système et les hypothèses alternatives d'évolution pour chacune de ces dimensions). Pour cela, on s'appuiera sur une revue de la littérature afin de repérer une diversité de modèles de systèmes agricoles sans pesticides. Les

scénarios décrivant des agricultures européennes sans pesticides (et les enjeux qu'ils posent pour une grande diversité de productions ayant des dépendances différentes à la protection phytosanitaire chimique), seront bâtis en regard d'un scénario de référence construit en partant des scénarios de base de TYFA de l'IDDRI (Poux et al. 2018) et en tenant compte de l'évolution des régimes alimentaires, du climat (impacts sur les bio-agresseurs et sur les plantes cultivées) et de la demande non alimentaire (bioénergie notamment et matière organique des sols).

4. Modélisation et simulation des scénarios (impacts terres, biodiversité, santé)

Une activité de quantification des scénarios sera réalisée à partir de modèles de simulation numérique qui permettra d'évaluer, à une échelle européenne, les impacts des différents scénarios d'agriculture sans pesticides sur de multiples dimensions telles que l'usage des terres, l'environnement (dont la biodiversité), les émissions de GES, la nutrition et la santé ou les marchés agricoles en les inscrivant dans une échelle mondiale. Ces évaluations permettront de préciser les conditions nécessaires des différentes transitions. Les hypothèses de rendement devront évaluer les effets de la suppression des pesticides, avec maintien des apports azotés et reconception des systèmes de cultures. A partir des recherches soutenues par le PPR, il s'agira d'identifier les effets du déploiement de nouvelles pratiques ou de nouvelles technologies permettant cette reconception (robotique/agroéquipement, biocontrôle, génétique, agronomie).

5. Identification des trajectoires de transition vers des scénarios sans pesticides en Europe.

A partir de l'analyse qualitative (étape 3) et des modélisations numériques (étape 4), on s'attachera à préciser les trajectoires pour aller vers un scénario d'agriculture sans pesticides

6. Mise en débat des scénarios et des trajectoires de transition

7. Rédaction des livrables et communication publique des résultats de la prospective

En terme organisationnel, la prospective s'appuiera sur deux entités qui, prises conjointement, constituent le forum de prospective : un groupe d'experts et une équipe projet. L'opération sera réalisée en 24 mois.

5.1.3. Colloques internationaux et rencontres « terrain » autour des thématiques du PPR

Des colloques seront organisés chaque année sur les thématiques du PPR (en moyenne deux par an), relevant de deux démarches différentes.

Le premier type de colloque sera un colloque scientifique international, ayant pour but de rassembler des chercheurs français et étrangers sur une thématique de recherche en front de science. Il servira à confronter les thématiques et les approches des projets de recherche financés dans le PPR avec celles de chercheurs étrangers, et à déployer à l'international la vision du PPR.

Le second type sera une rencontre entre chercheurs et professionnels sur une thématique du PPR à retombée socio-économique potentielle, de préférence organisée en province avec de possibles visites de terrain. Ces rencontres pourront être organisées soit en amont ou en accompagnement d'actions lancées, soit pour présenter des résultats obtenus.

La programmation sera affinée au long du PPR. Les premières thématiques identifiées qui pourront donner lieu à colloques les deux premières années du PPR sont les suivantes :

Colloques scientifiques internationaux

- Coûts cachés des pesticides (Comment mesurer les coûts cachés des pesticides, en particulier en lien avec la santé des travailleurs agricoles).
- Agronomie, écologie et génétique des interactions bénéfiques à la réaction immunitaire des plantes et la résistance des couverts végétaux aux infestations.
- Microbiome pour la santé des plantes.

- Rencontres chercheurs-professionnels
- Approches participatives pour la sélection et l'utilisation de nouvelles espèces dans les systèmes de cultures (en associant sélectionneurs et acteurs de l'aval des filières)
- Détection et caractérisation des pratiques et organisations favorisant la régulation des attaques de bioagresseurs (importance de l'identification des innovations de terrain et nécessité de rencontres régulières sur le sujet)
- Biocontrôle/Biointrants (possibilité de l'organiser en « *side event* » du congrès Natural Products and Biocontrol, portant sur les composés naturels impliqués dans les processus de biocontrôle, Perpignan 2020 et 2022)

5.1.4. Synthèses des connaissances

Les connaissances à synthétiser sont à la fois issues des connaissances scientifiques de la littérature et en particulier celles produites dans les nombreux projets de recherche recensés sur la thématique (voir partie 3 de ce document) et des connaissances de littérature grise, notamment celles issues de dispositifs d'expérimentations existants. La synthèse de ces connaissances devra donner lieu à différents types de production : des ouvrages de synthèse, des articles scientifiques (« position papers »).

Il y a par ailleurs un manque évident de ressources et de connaissances actionnables pour accompagner les agriculteurs dans la transition vers des systèmes « zéro pesticides » (sauf dans une certaine mesure pour l'AB). Des plateformes de partage de connaissances et de pratiques innovantes sont en cours de construction : Ecophyto PIC – GECO (<http://geco.ecophytopic.fr/>) mais leur déploiement est limité par la traduction et la formalisation des connaissances. En concertation avec Ecophyto, il est envisagé que le PPR puisse contribuer au développement de ces outils de capitalisation des connaissances.

Une double activité de production de synthèses sera donc réalisée, d'une part à destination des communautés scientifiques et d'autre part des professionnels agricoles. Elle sera coordonnée par le comité d'animation, et s'appuiera sur à la fois sur les projets de recherche passés et sur ceux financés dans le cadre du PPR. Elle sera articulée avec le travail de Prospective. La formalisation des connaissances actionnables sera effectuée en

collaboration avec Ecophyto et les livrables pourront être intégrés à la base de connaissances GECO.

5.2 Axes « fronts de science » de l'appel à projets

Les thématiques suivantes ont été identifiées comme nécessitant un effort particulier de création de connaissances sur des fronts de science. Ces priorités sont issues de la réflexion au sein des défis et dans la discussion inter-défis. Les éléments de description détaillée qui les fondent et qui sont décrits dans la section 4 n'ont pas été repris ici.

Les durées des projets, les montants financiers ainsi que leur nombre et leur séquençage sont indicatifs de la pondération souhaitée entre les différentes actions.

Ils sont organisés en deux ensembles, l'objectif étant d'inciter à la pluri/interdisciplinarité à l'intérieur de chaque bloc.

Il s'agirait, pour chaque ensemble de thématiques, de financer des projets transdisciplinaires relativement longs (6 ans) et structurants vis-à-vis des communautés scientifiques, donc à financement marginal relativement élevé (autour de 3 millions d'euros par projet).

5.2.1. Couverts végétaux à forte diversité fonctionnelle, microbiome et résistances des plantes pour des systèmes de cultures sans pesticides.

Type d'appel à projets : *Projets de recherche collaboratifs (avec participation partenaires privés encouragée) ; durée des projets 6 ans ; nombre de projets susceptibles d'être soutenus : 3.*

Trois objectifs sont présents dans cette première thématique avec de fortes interactions entre eux : comprendre les interactions plantes/plantes pour développer des couverts végétaux à forte diversité fonctionnelle (mélanges d'espèces, de variétés, cultures dérobées, plantes de service..), étudier les relations au sein du microbiome pour utiliser les effets des microorganismes sur la régulation des bioagresseurs et enfin identifier et exploiter de nouvelles sources de résistances des plantes en tenant compte de ces interactions.

Couverts végétaux à forte diversité fonctionnelle

Les interactions positives ou négatives entre les plantes (interactions biochimiques, compétitions sur les ressources) ont été peu étudiées, alors qu'elles constituent une voie prometteuse de contrôle naturel des bioagresseurs, tout en maintenant, voire en augmentant (dans certaines conditions) la productivité. Les propriétés de certaines espèces dépendent des métabolites secondaires qu'elles contiennent, mais aussi de la gestion de leur association avec les espèces principales et de leurs résidus. L'effet, direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante sur un autre organisme, permet d'expliquer l'effet positif sur le rendement d'une association d'espèces, l'effet de cultures intermédiaires sur les adventices et les pathogènes du sol, l'effet de plantes de service associées sur l'attractivité des insectes, etc.

A l'échelle de la parcelle, des effets positifs peuvent être obtenus via l'introduction de diversité génétique et/ou de diversité spécifique. Cette diversification est un levier très important pour maintenir un réservoir d'organismes bénéfiques pour les cultures, mais

aussi pour alterner les espèces hôtes, et donc réduire les maladies et ravageurs. Si des effets allélopathiques positifs entre plantes ont été mis en évidence en conditions de laboratoire, et si des expérimentations existent sur associations d'espèces, plantes de services, cultures sous mulch, nous faisons face à des déficits de connaissances importants sur les espèces et les traits fonctionnels les plus favorables, sur les mécanismes à l'œuvre et sur les conditions d'expression de ces effets bénéfiques.

Connaissances sur le microbiome pour la santé des plantes

Le microbiome (ensemble des microorganismes et de leur aire de vie) est un élément central dans l'agrosystème et pour les processus agroécologiques : sa composition et sa dynamique spatiale et temporelle dépendent des plantes cultivées et des adventices, des conditions pédoclimatiques et des pratiques agronomiques qu'elles influencent en retour. Le microbiome peut aussi impacter différenciellement les plantes cultivées et les adventices, directement (biofertilisation, symbioses microbiennes, toxicité, etc.) et indirectement (effets biocide ou compétition avec les micro-organismes ou macro-organismes bénéfiques ou néfastes pour les plantes). Son exploitation pour la santé des plantes nécessite une compréhension fine des mécanismes expliquant les interactions directes ou indirectes entre les micro-organismes qui le composent.

L'exploration du microbiome est une source majeure d'innovation en santé des plantes, pour plusieurs raisons. Elle peut permettre l'identification de micro-organismes candidats pour une utilisation sous forme de produits de biocontrôle (composés d'un ou plusieurs micro-organismes). Elle doit aussi conduire à découvrir des modes d'action originaux qui devraient ouvrir sur de nouvelles stratégies de protection ou stimulation des plantes. Ces stratégies pourraient aller jusqu'à la gestion du microbiome des agrosystèmes, à l'instar de la lutte biologique par conservation jusqu'ici appliquée aux macro-organismes. Le principe agroécologique d'occupation des niches écologiques pour ne pas laisser l'espace vacant aux pathogènes (au sein d'un biofilm de microorganismes sur les feuilles, les semences, les organes à protéger) pourrait faire partie des chemins à creuser. Les questions de recherche soulevées sont multiples : Quels mécanismes sous-tendent les diverses interactions détectées au sein du microbiome et entre le microbiome et la plante (holobionte) ? Comment inférer les réseaux complexes d'interactions au sein du microbiome ? Comment prendre en compte la diversité des types de micro-organismes ? Quels modes d'actions pourraient être utilisés en protection des plantes, face aux stress biotiques et abiotiques ? Quels déterminants du succès de ces modes d'action ? Comment utiliser au mieux les types de micro-organismes jusque-là peu ou pas utilisés (comme les phages par exemple) ?

Il s'agit aussi de promouvoir le changement de paradigme vers l'utilisation d'une unité complexe qui intègre l'espèce végétale et son cortège d'organismes protecteurs plutôt que la semence ou le plant nu. Au sein des ressources génétiques, certaines variétés ou espèces pourraient tirer un meilleur profit que d'autres de la valorisation de cette interaction. Deux directions peuvent être identifiées pour cela. Une première relève de l'installation des associations favorables, qui peut nécessiter des travaux sur les procédés d'implantation de la communauté voulue sur une surface déjà colonisée sans passer par une action de stérilisation brutale qui rende le milieu durablement inhospitalier pour le microbiome que l'on veut voir s'implanter. La seconde concerne les matrices d'enrobage dans lesquelles les communautés associées aux semences ou aux plants vont pouvoir être apportées et protégées tout en maintenant la capacité de manipulation de l'ensemble le long de la chaîne de production, stockage, distribution et d'utilisation par l'agriculteur.

Maitriser cela nécessite des travaux fondamentaux embarquant notamment la connaissance sur les matériaux, les biomatériaux, les méthodes de biotisation.

Augmenter la résistance des plantes pour une agriculture sans pesticides

L'amélioration génétique est un levier indissociable de l'évolution des pratiques culturales et des systèmes de culture. Il s'agit de développer le continuum entre la physiologie, la génétique, l'agronomie et l'écologie. Il sera notamment nécessaire de connaître les mécanismes biologiques et écologiques ainsi que le déterminisme génétique à l'origine des défenses des plantes et du comportement des structures spécifiques et génétiques plus complexes qui pourront être utilisées dans le cadre de la diversification des cultures.

Les fronts de recherche pour l'amélioration de la résistance des plantes aux bioagresseurs devront ainsi combiner différentes approches et différentes échelles. Il faudra identifier et exploiter de nouvelles sources de résistance et développer les stratégies innovantes permettant de tenir compte de l'évolution et de la dynamique des populations de bioagresseurs. L'introduction de nouvelles sources de résistance devra se faire en intégrant des niveaux de diversité à différentes échelles spatio-temporelles (parcelle, paysage, rotation) et en considérant différents niveaux d'organisation (individu, population, communauté). Les mécanismes physiologiques, génétiques et écologiques, de la résistance seront à étudier en prenant en compte les mécanismes basés sur les interactions plante-plante et plante-organismes associés. Ceci permettra d'améliorer la résistance des cultures (pures et mélanges d'espèces et/ou variétés) et des composants individuels de ces cultures. Ceci conduira à déterminer les traits d'interactions des plantes et des valeurs de traits pour optimiser les objectifs des mélanges de variétés/espèces, à caractériser les espèces et génotypes pour ces traits et à identifier les traits de plantes susceptibles de diriger la composition et la dynamique du microbiote et plus largement les populations d'organismes associés bénéfiques à différentes échelles spatio-temporelles.

5.2.2. Conception innovante des systèmes de cultures, déploiement du biocontrôle et leviers socio-économiques de la transition.

Type d'appel à projets : *Projets de recherche collaboratifs (avec participation partenaires privés encouragée)*; durée des projets 6 ans; nombre de projets susceptibles d'être soutenus : 3.

Cette thématique porte sur les leviers agronomiques et socio-économiques permettant de concevoir et déployer des systèmes de cultures sans pesticides. Les trois thématiques ci-dessous pourront donner lieu à des projets ciblés ou transversaux.

Conception de systèmes de cultures ciblant prioritairement la régulation des bioagresseurs

Il s'agira d'analyser les conditions d'expression des effets positifs d'une diversité d'espèces au champ, de quantifier les effets susceptibles d'être attendus, et de proposer des modalités de conduite technique permettant de maximiser les bénéfices des effets d'interaction et allélopathiques, en interaction avec le reste du système de culture. Simultanément, le développement d'agroéquipements adaptés devra permettre de gérer des mélanges d'espèces ou cultures dérobées. Par exemple, des agroéquipements avec une capacité de récolte sélective et déportée devront être développés pour récolter une culture sous couverts de manière ciblée et rapide.

Il s'agit également de produire des connaissances qui permettront d'augmenter l'utilisation et de faciliter le déploiement des méthodes de régulation. Les méthodes recouvrent les pratiques agronomiques comme les organisations à l'échelle de la parcelle ou du territoire visant à éviter l'émergence, le développement ou la dispersion des populations de bioagresseurs. Elles peuvent aussi s'appuyer sur des mécanismes de régulation procurés par les auxiliaires résidents. Si cela s'avère insuffisant, elles peuvent alors s'appuyer sur l'introduction dans l'agrosystème d'organismes (dans le but de les établir à plus ou moins long terme) ou de substances affectant négativement les bioagresseurs, directement (effet biocide, compétition) ou indirectement (promotion de l'effet des organismes auxiliaires ou stimulation des défenses des plantes). Enfin, les innovations technologiques en agroéquipements sont nécessaires pour cibler directement les bioagresseurs (utilisation de laser pour détecter et neutraliser les bioagresseurs, dispositifs pour les compter, mais aussi leur ménager une place par stérilisation localisée des sols ou des organes végétaux, etc.), faciliter la diffusion et l'installation des organismes ou substances ou faciliter la mise en œuvre de pratiques agronomiques qui défavoriseront les bioagresseurs.

Il est essentiel de mettre au point des approches de conception ou de modification de systèmes de culture capables d'intégrer les connaissances sur chacune des méthodes à combiner et de créer les conditions favorables pour cette transition dans les approches mises en œuvre.

Déploiement des méthodes de biocontrôle

Un effort particulier de recherche semble indispensable sur les méthodes de biocontrôle actuellement peu ou pas utilisées en Europe mais qui s'avèrent très prometteuses et se développent dans divers pays, comme par exemple les méthodes utilisant les techniques de l'insecte stérile et l'acclimatation d'organismes auxiliaires des cultures ou des organisations collectives de mise en œuvre de lutte biologique. Ces exemples relevant du champ du biocontrôle pourront constituer des cas d'étude particulièrement propices à la convergence d'équipes de recherche et de développement, possédant des compétences complémentaires sur les différents types de déterminants du succès de déploiement (sciences humaines et sociales, droit, biologie, écologie, agronomie, robotique et numérique), autour d'objets et de questions communes. Ces cas d'étude présentent par ailleurs le potentiel de viser des défis de recherche interdisciplinaire (production de connaissances) tout en facilitant des succès opérationnels nécessitant des partenariats intersectoriels (recherche, développement agricole, producteurs, agroalimentaire, élus locaux, etc.). Les sorties attendues de ce type d'approche recherche-action sont donc à la fois des connaissances originales et des *success-stories* démontrant la faisabilité de déployer des méthodes contribuant à une transition vers une agriculture sans pesticides. Des nouveaux modèles économiques venant soutenir le développement du biocontrôle devraient logiquement en résulter (appropriation du biocontrôle par des interprofessions, des groupements d'acteurs territoriaux, des appellations, etc.). Les déterminants du déploiement d'ordre économique, social, organisationnel, réglementaires, en partie ou totalement dépendants de politiques publiques sont particulièrement clés. Il faut les identifier pour les convertir en leviers et ainsi configurer un environnement économique, social et juridique favorable à la création et à la diffusion des méthodes : quelles sont les motivations des agriculteurs pour mettre en œuvre des mesures préventives ? quelles conditions de réussite des pratiques prophylactiques ? quels modèles économiques à développer ? Quelles innovations réglementaires au niveau

national et international ? Quelles politiques publiques pour favoriser et accompagner l'essor de l'innovation technologique et organisationnelle ?

Leviers socio-économiques et transition pour une sortie des pesticides

Des travaux de recherches en sciences humaines sociales sont nécessaires pour identifier l'ensemble des leviers permettant une transition vers des systèmes sans pesticides.

La décision de réduire ou supprimer l'utilisation des pesticides dépend beaucoup de l'organisation du travail dans l'exploitation et des modèles économiques des exploitations. Il est nécessaire de comprendre les transformations actuelles des modèles d'exploitations, les formes de travail et leurs liens avec l'utilisation des pesticides (séparation capital/travail, recours accru au salariat, augmentation de la taille des exploitations, sous-traitance des tâches d'épandage des pesticides).

La capacité à aller vers une production « 0-pesticides » dépend aussi de son intégration dans des relations verticales au sein des filières. La transition doit être pensée dans un contexte de reconfiguration des chaînes de valeur mobilisant labels et certifications de qualité, traçabilité et numérique. Il apparaît nécessaire de mieux comprendre les stratégies des acteurs privés, mais aussi leurs effets aux échelles des filières et des territoires : mise en place de standards volontaires ou de contrats spécifiques, nouvelles modalités de traçabilité des informations, créations de nouveaux produits ou marchés.

Il est également nécessaire d'analyser les motivations et les difficultés des agriculteurs qui réduisent les pesticides et les connaissances qu'il faut produire pour les accompagner dans la transition : formation, accès aux connaissances et mise en pratique, circulation des connaissances entre agriculture biologique, agriculture conventionnelle, agriculture sans pesticides, effets des transformations du conseil et de la R&D sur la circulation de connaissances (séparation vente pesticides/conseil, rôle des réseaux sociaux, etc.). Il faut également accompagner les démarches participatives pouvant faciliter cette reconception agroécologique des systèmes de production agricole.

Enfin, il faut étudier comment les politiques publiques peuvent mieux encourager la sortie des pesticides. On sait que la transition résulte de différentes politiques : règles des autorisations de mise en marché, PAC, politiques de soutien à l'innovation. Il s'agit d'étudier les effets croisés de ces différentes politiques, mais aussi les initiatives territoriales et les nouvelles formes de gouvernance et travailler sur le design de politiques publiques innovantes pour encourager le changement de pratiques.

5.3 Axe « outils structurants » de l'appel à projets

Trois priorités ont été identifiées qui nécessitent des actions ciblées permettant de créer des outils et dispositifs structurants pour opérationnaliser la transition. Des appels à projets spécifiques seront lancés pour chacun d'entre eux. Les durées des projets, les montants financiers et leur séquençage sont indicatifs de la pondération souhaitée entre les différentes actions.

5.3.1. Epidémiologie pour la prophylaxie

Type d'appel à projets : Projets de recherche collaboratifs avec partenariat entreprise (pourrait correspondre à un AAP ANR de type Challenge) Durée des projets : 48 mois ; nombre de projets susceptibles d'être soutenus : 3 à 6.

La démarche préventive sur laquelle repose la prophylaxie se fonde sur la prise en compte du cycle des adventices, ravageurs et maladies. Le but consiste à identifier les étapes sur lesquelles agir en vue d'actionner en temps opportun les outils de maintien des trajectoires des populations dans des gammes acceptables. Le renforcement de la prophylaxie passe clairement par une généralisation des méthodes d'observation (via leur automatisation) et de suivi biologique dans le temps.

Pour cela, un dispositif d'épidémiologie nouveau (épidémiologie 2.0) doit être créé qui repose sur le développement de méthodologies, d'outils et d'indicateurs appropriables par les acteurs du développement. Cette épidémiologie en continu est actuellement trop peu développée pour que l'on sache intégrer les mesures préventives dans les préconisations.

L'ambition est triple : i) il s'agit d'abord d'outiller les acteurs avec des capteurs de nouvelle génération en réseau susceptibles de rendre compte, en temps réels, de la réalité biologique impliquée dans l'épidémiologie ; ii) ensuite, il s'agit de travailler les métriques et modélisations les plus à même de couvrir les trajectoires d'évolution des risques dans leur dimension dynamique temporelle sur l'ensemble de la saison de culture et en tenant compte de la diversité des conditions environnementales, ceci afin de pouvoir qualifier la portée des mesures prophylactiques prises ; iii) enfin, il s'agit de permettre, par le déploiement de sites instrumentés, le partage des informations entre acteurs pour tirer profit des avancées.

Les questions de recherche et champs thématiques concernés sont :

- la mise en place de dispositifs instrumentés d'observation des variables d'état de diverses natures de l'agrosystème (Srbínovska et al. 2015). Il s'agit de se concentrer sur des dispositifs de capteurs de nature diverse, tant optique, chimique (Laothawornkitkul et al. 2008), physique que biologique (i.e. outils moléculaires), ou hybrides, facilitant la reconnaissance précoce des bioagresseurs ainsi que le suivi de l'état physiologique des plantes (état de stress, sensibilité, résistance, réceptivité aux stimulateurs, etc.) (Mahlein et al. 2012). Ces recherches visent la détection plus ou moins automatisée des bioagresseurs, pathogènes et auxiliaires mais pourraient également s'étendre à d'autres pans de la biodiversité présente dans l'agrosystème. Cette extension à la santé de l'environnement serait le gage de pouvoir inscrire la couverture des services écosystémiques par des systèmes sans pesticides dans les cahiers de charges (Leake et al. 2004),
- l'utilisation des démarches liées à l'Intelligence Artificielle permettant de traiter la grande masse et la diversité des informations produites par les réseaux de capteurs, en les mettant en relation avec les données climatiques et modèles de croissance des cultures,
- des métriques sont à développer qui permettent de donner de la visibilité aux bénéfices des mesures prophylactiques proposées par l'agroécologie : potentiel des régulations biologiques, delta d'inflexion des trajectoires démographiques, état des réservoirs d'inoculum, etc.,

- des dispositifs dédiés permettant de documenter la portée des mesures prophylactiques pratiquées à travers le suivi aux échelles spatiales et temporelles les trajectoires démographiques des bioagresseurs et des auxiliaires,
- faire progresser, par le partage entre acteurs, la standardisation des réseaux de collecte, de stockage, de partage, de traitement et d'utilisation de l'information. Cela contribuera à mieux valoriser les informations collectées ; cela ouvrira aussi le champ de la qualification de la santé des cultures comme un bien commun avec des implications sur la qualification et la certification des pratiques à des échelles larges (distinction entre effet direct et différé, entre action locale ou diffuse et bénéfique sur le voisinage) à des précisions sur les conditions à réunir pour garantir leur efficacité et, enfin, à des usages de négociations commerciales entre pays dans une optique de barrière non tarifaire (Sachs et al. 2010).

5.3.2. Infrastructures dédiées à la caractérisation de l'exposome chimique

Type d'appel à projets : Appel à manifestation d'intérêt pour infrastructure de recherche, éventuellement prise en charge par l'action Equipements structurants pour la recherche du PIA3.

Prenant en compte la contamination actuelle des milieux par des pesticides et leurs métabolites dérivés ainsi que les contaminations futures, liées à la temporalité des transitions, mais également l'arrivée sur le marché et l'usage de nouvelles molécules, il est nécessaire de disposer de connaissances précises sur l'exposition aux pesticides et sur des marqueurs de leurs effets potentiels. Caractériser l'exposition aux pesticides relève de plusieurs démarches complémentaires : (1) évaluer la contamination de l'environnement et de l'alimentation et en déduire la contamination de l'homme à partir de modèles toxicocinétiques et de données de consommation, (2) mesurer directement la contamination de l'homme (biomonitoring) et utiliser des modèles d'exposition pour déduire la source de contamination la plus probable. Cette deuxième approche (qui correspond à l'exposome chimique) permet aussi de coupler aux marqueurs d'exposition un certain nombre de marqueurs moléculaires d'effet basés en particulier sur des données de métabolomique.

Le concept d'exposome, apparu au cours des dernières années, regroupe l'ensemble des expositions susceptibles de conduire à des impacts sur la santé ; il est donc complémentaire de la prise en compte des facteurs génétiques pour établir la cause des maladies. Ce concept présente une dimension temporelle puisqu'il intègre toutes les expositions environnementales, de la période prénatale (*in utero*) à la fin de vie. Il prend en compte les nuisances de nature physique, chimique, biologique, radiologique, psychologique et socio-économique et comprend les facteurs liés au mode de vie. Il doit permettre de découvrir de nouvelles associations entre exposition et maladies.

La caractérisation de l'exposome nécessite de combiner diverses méthodologies d'évaluation de l'exposition, comprenant des analyses d'échantillons biologiques, mais également la mesure de l'environnement de chaque individu, en utilisant par exemple des capteurs connectés et des questionnaires détaillés. La caractérisation des molécules (ou de leurs métabolites), dans des échantillons biologiques de faible volume, et à un coût et dans un délai raisonnables, nécessite des approches nouvelles, des développements méthodologiques importants et des infrastructures performantes notamment en spectrométrie de masse de haute résolution. Le couplage à partir d'un même échantillon biologique de la détection de substances exogènes et de leurs métabolites d'une part, à

l'analyse d'effets potentiels sur le métabolome humain d'autre part est aussi un défi important.

Afin de caractériser au mieux l'exposome chimique de la population française à différents stades de la vie en ciblant en priorité les produits phytopharmaceutiques, il est nécessaire de créer une infrastructure de haut niveau sur l'exposome chimique, capable de répondre aux questions complexes de la multiexposition aux produits phytosanitaires et leurs métabolites et plus généralement aux contaminants environnementaux qui peuvent interférer avec leur toxicocinétique et leur toxicodynamie. Elle pourra aussi révéler des marqueurs moléculaires d'effet de ces substances. Elle permettra de franchir un pas déterminant en matière de lien environnement-santé et pourra donner à terme, aux équipes de recherches françaises, la possibilité de revendiquer le leadership européen dans ce domaine.

5.3.3. Recherches en articulation avec les dispositifs expérimentaux et d'innovation « zéro pesticides »

Type d'appel à projets : Projets de recherche collaboratifs avec partenariat entreprise et/ou cofinancement Ecophyto ; **Durée des projets :** 36 mois ; **nombre de projets susceptibles d'être soutenus :** 15 ; *Ce type d'appel à projets pourrait être lancé en dehors du PPR proprement dit.*

Il existe plusieurs expérimentations de pratiques et de systèmes de cultures permettant de développer des alternatives aux pesticides. Le dispositif DEPHY EXPE est un réseau d'expérimentations de pratiques et systèmes de cultures économes en pesticides. Inscrit dans le plan Ecophyto II, il est la composante expérimentale du réseau DEPHY. En 2017, 23 nouveaux projets ont été sélectionnés dans le cadre de l'appel « DEPHY-EXPE Expérimentation de systèmes agro-écologiques pour un usage des pesticides en ultime recours ». Ils ont démarré en 2018 pour une durée de 4 à 6 ans. La plupart d'entre eux expérimentent des systèmes en « zéro pesticides » (ou contiennent une modalité « zéro pesticides »). Un nouvel appel est en cours, pour sélectionner une vingtaine d'autres projets qui démarreront en 2019. Au total, ce sont donc une quarantaine de projets expérimentaux qui se dérouleront dans le temps du PPR sur des systèmes ayant une composante sans pesticides. L'objectif de cet axe du PPR est de soutenir des travaux de recherches en articulation avec ces dispositifs expérimentaux. Il pourra s'agir de travaux dans lequel l'expérimentation DEPHY permet l'accès à des données ou des échantillons biologiques (par exemple sur le microbiote des cultures, sur les interactions entre plantes..) ou l'expérimentation d'outils mis au point dans des travaux de recherche (par exemple des capteurs biologiques).

A côté des dispositifs expérimentaux DEPHY Ecophyto, d'autres initiatives d'innovation contribuant à la transition vers des systèmes sans pesticides existent actuellement. Ils s'insèrent notamment dans les réseaux européens du PEI Agri (groupes opérationnels), dans des Living Labs ou des projets de Territoires d'Innovation (Appel à Projets TIGA) ou sont portés par des groupes d'acteurs (coopératives, associations d'agriculteurs, associations de citoyens). Des projets de recherche sur les thématiques du PPR et adossés à des initiatives de ce type pourront être soutenus ici.

6. Dimension européenne et internationale

Ce Programme Prioritaire de Recherche sur la sortie des Pesticides est mis en place à l'initiative du Ministère français de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Cependant, il rejoint une dynamique internationale forte, à la fois en termes de recherche, d'ambition politique, notamment en Europe, et de préoccupation sociétale, largement partagée au niveau mondial. Ceci est attesté par le grand nombre de projets de recherche soutenus durant les programmes cadre FP7 et H2020.

Les projets sur les fronts de recherche et les outils structurants mis en place permettront d'identifier et de renforcer des équipes et des communautés nationales de recherche capables d'afficher un leadership européen et mondial.

Le PPR doit permettre de déployer cette ambition européenne au travers de 3 leviers :

1) Comme déjà mentionné plus haut, le PPR sera doté d'un conseil scientifique international, présidé par une personnalité scientifique européenne reconnue et partageant l'ambition portée par ce PPR.

La composition du conseil scientifique devra être finalisée rapidement. Il comportera 50% de chercheurs européens, les représentants des principaux organismes de recherche publique concernés par le PPR et des représentants de l'industrie.

2) En cohérence avec l'ambition du PPR, l'Inra a porté devant la Commission Européenne et les DG Recherche, Agriculture et Santé, une priorité pour le prochain programme-cadre Horizon Europe. Cette priorité s'intitule 'Towards a chemical pesticide-free agriculture'. Cette priorité a été discutée avec différents pays européens, notamment avec l'Allemagne à l'occasion d'une rencontre des Ministres de la Recherche.

Pour poursuivre la construction de cette priorité et définir des thématiques prioritaires possibles dès le lancement d'Horizon Europe en 2021, des séminaires ont été mis en place pour partager cette ambition et l'alimenter avec des questions de recherche. Un premier séminaire s'est tenu à Paris le 5 octobre 2018, regroupant des chercheurs de 8 pays (France, Allemagne, Pays-Bas, Finlande, Hongrie, Croatie, Italie, Espagne). Le prochain séminaire se tiendra le 8 mai 2019 à Berlin, où d'autres pays européens seront invités à rejoindre cette dynamique.

Outre la proposition de thématiques à destination de la Commission, ces séminaires produiront également des « position papers » sur différentes thématiques. Les thèmes retenus sont

- Biocontrol, Insects and Microbiome
- Genetics and New Species for New Services
- Technology, Modelling and Agro-equipment
- Agri-food System Transition and Societal Adoption
- Environment, Economy and Trade
- Advisory systems and farmers groups
- Performances of present and future agri-food systems

Un lien continu sera assuré entre l'animation du PPR et cette dynamique européenne. Ce travail au niveau européen permettra de faire émerger des thématiques prioritaires du programme cadre Horizon Europe, traduites en appel à projets. Les AAP du présent PPR

sur les fronts de connaissance devront préparer les équipes de recherche française à assurer la coordination de projets européens.

3) Dans le cadre de la mise en œuvre de ce plan ambitieux, il est proposé d'instruire la possibilité de lancer des actions bilatérales, avec des pays hors Europe, sur des priorités identifiées dans ce document et qui auront été validées par le MESRI.

Il ne s'agirait pas évidemment de financer des équipes de recherche étrangères, mais de pouvoir, par des actions bilatérales, bénéficier des apports de recherche d'équipes internationales de haut niveau. Les niveaux de financement, ainsi que le périmètre exact des thématiques prioritaires devront être précisés.

7. Calendrier, retombées et impacts *in itinere*

L'intérêt du PPR est de soutenir un effort de recherche dans la durée, par des projets de recherche longs et ambitieux, avec l'objectif de produire des solutions permettant le déploiement d'une agriculture sans pesticides à l'horizon 2030-2040.

Il est cependant évident que son impact sera important à plus court terme, à la fois en favorisant la structuration d'une large communauté scientifique autour de cette ambition, et grâce à des livrables intermédiaires ayant une application dans une agriculture en transition.

Le calendrier ci-dessous permet de visualiser le déroulement dans le temps et les livrables au cours du programme.

7.1 Livrables

La proposition des tâches d'animation telle qu'exposée, permet de s'assurer de la diffusion des résultats de la recherche tout au long du programme.

On souligne en particulier que seraient réalisés:

- la réalisation de 2 colloques par an (un colloque à destination des communautés scientifiques et une rencontre avec des partenaires privés)
- la production de synthèses scientifiques et à destination des utilisateurs de la recherche tout au long du programme.
- la publication des résultats de la Prospective Agriculture sans pesticides, en 2022.
- l'organisation d'un séminaire à mi-parcours des projets Fronts de Science, avec diffusion des résultats intermédiaires, en 2022.
- des événements de dissémination des résultats des outils structurants : Exposome et Epidemiosurveillance 2.0 (compétition finale de l'AAP ANR Challenge prévue en 2023).
- des échanges réguliers au sein des projets multi-acteurs articulés aux dispositifs expérimentaux DEPHY et aux dispositifs locaux d'innovations (15 projets financés entre 2020 et 2024) et des colloques finaux de ces projets en 2023 et 2024.

Les résultats scientifiques qui seront obtenus dépendent évidemment des projets qui seront soumis et retenus par l'ANR pour financement. L'encadré ci-dessous identifie les impacts qui pourront être attendus, et potentiellement mobilisables au long du déploiement du PPR.

Impacts attendus

- des connaissances mobilisables par les agriculteurs sur les espèces « mineures », les cultures associées, les plantes de service, les cultures de diversification.
- savoir raisonner l'insertion de cultures de diversification dans les systèmes de culture.
- une gestion collective des bioagresseurs, à l'échelle du paysage.
- des systèmes d'agriculture de conservation sans pesticides, et en particulier sans herbicides, en s'appuyant sur une meilleure connaissance des effets de différentes modalités de travail du sol, avec des agroéquipements innovants.
- maîtriser la relation entre déploiement de pratiques prophylactiques et l'organisation du travail au niveau de l'exploitation agricole (et par les entreprises de travaux agricoles).
- de nouvelles sources et nouveaux mécanismes de résistances (traits et zones génomiques) dans les ressources génétiques disponibles et dans de nouvelles ressources à prospecter.
- des stratégies et méthodes de sélection permettant de générer de la diversité localisée dans le génome (édition du génome).
- de nouveaux traits génétiques pour les plantes de service (couverture en plante compagne, plante rotation).
- maîtriser l'évolution des résistances en lien avec la gestion de la diversité *in situ*.
- des variétés adaptées à un plus grand niveau de complexité des couverts.
- des variétés cultivées plus résistantes à leurs pathogènes et ravageurs et plus compétitives vis-à-vis de leurs adventices.
- le développement des méthodes et produits de biocontrôle et leur intégration dans les systèmes de culture.
- des données sur la durabilité des produits du biocontrôle.
- savoir valoriser par des signes de qualité les produits issus de systèmes sans pesticides.
- des agroéquipements de conduite, depuis le semis à la récolte, des peuplements hétérogènes à forte diversité fonctionnelle.
- des techniques d'application innovantes d'agents de biocontrôle, permettant de cibler l'application au moment le plus opportun.
- des outils et capteurs dédiés permettant de certifier les pratiques.
- des capteurs mesurant en continu la présence de populations de bioagresseurs.
- mieux comprendre les effets des politiques publiques sur l'utilisation des pesticides en agriculture et améliorer les politiques publiques existantes.
- disposer d'une analyse de l'utilisation des pesticides (molécules, produits homologués) sur les différentes productions et dans les territoires.
- des innovations organisationnelles efficaces pour la création de niches d'innovations.
- une capacité accrue des acteurs de R&D et de conseil agricole à produire des connaissances robustes et pertinentes pour accompagner les agriculteurs dans des trajectoires de réduction des pesticides.
- une digitalisation de l'agriculture au service d'une reconception efficace des systèmes et accompagnant l'apprentissage des agriculteurs
- un dispositif d'épidémiosurveillance basé sur des informations produites par des réseaux de capteurs mises en relation avec les données climatiques et modèles de croissance des cultures, associé à des technologies d'intelligence artificielle et accessible à tous.
- pouvoir caractériser l'exposome chimique de la population française à différents stades de la vie (incluant la période *in utero*) en ciblant en priorité les produits phytopharmaceutiques
- une capacité accrue de répondre aux questions complexes de la multiexposition aux produits phytosanitaires et plus généralement aux contaminants environnementaux.

- une base de ressources pour rendre compte des connaissances scientifiques, des savoirs experts et des expériences décrivant les moyens de favoriser la prophylaxie et la réduction de l'utilisation de pesticides, dans le but d'accompagner la conception de systèmes adaptés localement

7.2. Impacts du programme, évaluation en temps réel

Les impacts du programme PPR seront évalués tout au long de son déroulement, en utilisant une méthode de « chemins d'impacts » (*impact pathways*) par induction arrière. Le dispositif qui sera mis en œuvre se fonde sur une littérature importante (Joly et al., 2015 ; Matt et al., 2017 ; Joly et al., 2017) et sur les travaux de l'Inra concernant l'analyse des impacts de la recherche agronomique (Projet Asirpa). L'évaluation du PPR et des projets qui seront financés sera réalisée en temps réel. Alors que l'évaluation de l'impact de la recherche est le plus souvent réalisée *ex post*, il s'agira cette fois-ci de la réaliser *in itinere*, en temps réel.

L'ambition et les échelles de temps du PPR requièrent de prendre en compte deux caractéristiques essentielles dans cette évaluation :

1/ la non linéarité : les transformations visées sont de nature systémique, concernant à la fois les techniques mais aussi les systèmes de production dans toutes leurs dimensions. La contribution de la recherche et de l'innovation au changement sera donc à la fois directe et indirecte et résultera de processus partiellement émergents ; les impacts seront d'autant plus importants que les techniques innovantes et les systèmes seront coproduits ;

2/ la créativité (ou sérendipité) : l'effort de recherche étant prévu sur une échelle de temps long, il sera nécessaire de prendre en compte la possibilité que des solutions imprévues et non directement attendues émergent en cours de route.

Compte tenu de ces caractéristiques, l'évaluation sera formative et itérative. Par évaluation formative, on entend une évaluation qui a pour fonction d'améliorer l'apprentissage en cours, d'identifier les difficultés rencontrées, et de contribuer au maintien du programme sur un chemin d'impact. L'évaluation devra également être itérative car il faudra tenir compte des résultats et de leurs éventuels effets (y compris les non effets ou les effets négatifs) pour réviser régulièrement le chemin d'impact et, partant, reconsidérer les activités du programme/projet.

Dans le cas d'une évaluation en temps réel, l'évaluation par induction arrière part de la cible visée (« expected impact ») et remonte au présent. Les grands principes de la méthode qui sera déployée sont les suivants:

- Identification des objectifs de transformation, à l'horizon 2050 ainsi qu'à différents horizons de temps. Cette identification sera faite au niveau du programme mais aussi au niveau des différents projets financés ;
- Construction par induction arrière des chemins d'impact (niveau programme et projets), ce qui nécessitera d'explicitier les théories du changement sous-jacentes (Chen, 2012) ;
- Représentation des écosystèmes (programme et projets) : identification des facteurs facilitant/ limitant; identification des acteurs et de leur rôle potentiel ;
- Construction des scénarios : en déduire les principaux points de rendez-vous et les éléments de suivi anticipés ;

- Détermination des étapes intermédiaires, des résultats et des effets attendus.

Dans ce dispositif, l'évaluation périodique est participative. Son objectif premier est d'améliorer l'apprentissage en cours. Elle est complémentaire des activités de prospective et se fonde sur une identification des résultats scientifiques et de leurs éventuels premiers effets ainsi que sur le suivi des évolutions de l'environnement du programme. L'évaluation permettra ainsi à la fois de mesurer les impacts du programme et d'aider à sa gouvernance.

8. Conclusion

Ces propositions, pour un Programme Prioritaire de Recherche, constituent une véritable rupture dans le paysage de la recherche nationale. Elles sont construites sur la base de différentes ambitions :

- Ambition de réduction de l'usage des phytosanitaires, puisqu'il est proposé de se situer dans un contexte 0-pesticides. Aucun programme de recherche national ou européen ne s'est positionné à ce niveau d'ambition, ce qui permettra d'explorer des fronts de sciences et de techniques inédits,
- Ambition de changer de regards sur cette question, en explorant la capacité de mobiliser la prophylaxie, de construire des systèmes de cultures fondés sur l'agroécologie et comportant une forte diversité fonctionnelle, de combiner les leviers agronomiques et socio-économiques,
- Ambition pour explorer des fronts de science et pour développer des outils structurants,
- Ambition vis à vis des partenaires économiques pour les associer à la démarche et leur permettre de capturer très précocement les acquis de la recherche et accroître leur compétitivité à l'international, et vis-à-vis des partenaires académiques européens pour faire de ce PPR un véritable levier de la recherche française en Europe sur cette question essentielle.

Les ambitions portées par ce projet sont à la hauteur des attentes de la société pour une agriculture productive et capable de répondre aux demandes alimentaires en qualité et à un prix abordable pour tous et de faire ceci sans impact sur l'environnement.

Les ambitions portées par ce projet, les modalités d'animations et les différents instruments mis en œuvre permettront de mobiliser les meilleurs consortia nationaux, de développer des infrastructures originales, dotant ainsi la France de capacités nouvelles, et de tisser les liens nécessaires entre la recherche de pointe qui sera générée et les dispositifs existants, pour porter au plus vite les acquis de la recherche au plus près des agriculteurs et des acteurs économiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, A. P., & Gillooly, J. F. (2009). Towards an integration of ecological stoichiometry and the metabolic theory of ecology to better understand nutrient cycling. *Ecology Letters*, 12(5), 369-384
- Altieri M.A., Martin P.B., Lewis W.J., 1983. A quest for ecologically based pest management systems. *Env. Management*, 7, 91-100
- Andra SS, Austin C, et al., Trends in the application of high-resolution mass spectrometry for human biomonitoring: An analytical primer to studying the environmental chemical space of the human exposome. *Environment International* 100 (2017) 32–61
- Andrivon D., Bardin M., Bertrand C., Brun L., Daire X., Decognet V., Fabre F., Gary C., Grenier A.S., Montarry J., Nicot P., Reignault P., Tamm L., 2018. Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ? Rapport d'expertise scientifique collective, INRA, 185 p.
- Artru S., Garre S., Dupraz C., Hiel M.P., Blitz-Frayret C., Lassois L., 2017. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *Eur J Agronomy* 82, 60-70. DOI: 10.1016/j.eja.2016.10.004
- Baldi I, C.S., Coumoul X, Elbaz A, Gamet-Payrastre L, Le Bailly P, Multigner L, Rahmani R, Spinosi J, Van Maele-Fabry G, 2013. Pesticides, effets sur la santé. Expertise collective, synthèse et recommandations, Les éditions INSERM. INSERM, Paris.
- Bever, J.D., Platt, T.G., Morton, E.R., 2012. Microbial Population and Community Dynamics on Plant Roots and Their Feedbacks on Plant Communities. *Annual Review of Microbiology* 66, 265-283
- Bhattacharyya & Jha. 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J Microbiol Biotechnol* 28: 1327–1350; Backer et al. 2018. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Frontier in Plant Science*
- Boissard, P., Martin, V., & Moisan, S. (2008). A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops. *computers and electronics in agriculture*, 62(2), 81-93
- Borowiec et al. 2018 Early population dynamics in classical biological control: establishment of the exotic parasitoid *Torymus sinensis* and control of its target pest, the chestnut gall wasp *Dryocosmus kuriphilus*, in France. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 166. <https://doi.org/10.1111/eea.12660>
- Brevan et al., 2017, EFSA; <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1185>
- Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M., & West, G. B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 85(7), 1771-1789
- Carles M., Cahuzac, E., Guichard, L., Martin, P. (2015). Mieux suivre spatialement l'usage des pesticides, en particulier sur les bassins versants, en s'appuyant sur un observatoire des ventes détaillé au code postal de l'utilisateur final de produit. 46 p. Rapport d'étude, <https://prodinra.inra.fr/record/361107>
- Chen, H.T. (2012). Theory-driven evaluation: Conceptual framework, application and advancement. In R.Strobl, O. Lobermeier & W. Heitmeyer (Eds.), *Evaluation von Programmen und Projekten für einedemokratische Kultur* (pp. 17-40): Springer

- Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain N.M., 2009 ; Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 132 (2009) 237–242
- Colbach N., Kurstjens D.A.G., Munier-Jolain N.M., Dalbiès A., Doré T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through mechanistic modelling of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *Europ. J. Agronomy* 32 (2010) 205–218
- Colbach N., Meynard J.M. (1995) Soil tillage and eyespot: influence of crop residue distribution on disease development and infection cycles. *European Journal of Plant Pathology* 101, 601-611
- Conway, G. (1985). *Agroecosystem analysis*. Working Paper, Imperial College of Science and Technology, 51p.
- Coquil X, Béguin P, Dedieu B (2014) Transition to self-sufficient mixed crop–dairy farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 29(3):195–205. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000458>
- Cowan, R., & Gunby, P. (1996). Sprayed to death: Path dependence, lock-in and pest control strategies. *Economic Journal*, 106(436), 521-542. doi: 10.2307/2235561
- Cowan, R., & Hultén, S. (1996). Escaping lock-in: The case of the electric vehicle. *Technological Forecasting and Social Change*, 53(1), 61-79. doi: 10.1016/0040-1625(96)00059-5
- David, P. A. (1985). Clio and the economics of qwerty. *American Economic Review*, 75(2), 332-337
- Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.-M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 73–86, <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008050>.
- Deguines, N., Jono, C., Baude, M., Henry, M., Julliard, R., Fontaine, C., 2014. Large-scale trade-off between agricultural intensification and crop pollination services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12, 212-217.
- Djidjou-Demasse R., Moury B., Fabre F. (2017) Mosaics often outperform pyramids: insights from a model comparing strategies for the deployment of plant resistance genes against viruses in agricultural landscapes. *New Phytol.* 216 (1): 239-253. (<https://doi.org/10.1111/nph.14701>).
- Ecophyto, 2018, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, note de suivi 2017 du Plan Ecophyto, 36 pages.
- Flint, M.L., Gouveia, P., 2001. *IPM in Practice. Principles and Methods of Integrated Pest Management*. University of California. Oakland, CA, USA
- Ge, Y., Thomasson, J. A., & Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*, 5(3), 229-238
- Gliessman, S. R. (Ed.). (2000). *Agroecosystem sustainability: developing practical strategies*. CRC Press
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M. H., Meynard, J. M., Reau, R., Savini, I. (2017). Ecophyto, the French action plan to reduce pesticide use : a failure analyses and reasons for hoping. *Cahiers Agricultures*, 26 (1), 12 p. DOI : 10.1051/cagri/2017004
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H, et al. (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12 (10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Hamzei, J., Seyedi M., 2015. Evaluation of the Effects of Intercropping Systems on Yield Performance, Land Equivalent Ratio, and Weed Control Efficiency. *Agricultural Research* 4, 202-207 DOI: 10.1007/s40003-015-0161-y

Hatchuel, A., Weil B. (2009). "C-K design theory: an advanced formulation." *Research in Engineering Design* Vol. 19: pp. 181-192.

Hossard, L., Archer, D. W., Bertrand, M., Colnenne-David, C., Debaeke, P., Ernfors, M., Jeuffroy, M.-H., Munier-Jolain, N., Nilsson, C., Sanford, G. R., Snapp, S. S., Jensen, E. S., Makowski, D. (2016). A meta-analysis of maize and wheat yields in low-input vs. conventional and organic systems. *Agronomy Journal*, 108 (3), 1155-1167. DOI : 10.2134/agronj2015.0512

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

IARC, Les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France métropolitaine http://gco.iarc.fr/includes/PAF/PAF_FR_report.pdf

IGAS, La création d'un fonds d'aide aux victimes de produits phytopharmaceutiques <http://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/2017-M-043-03-DEF.pdf>

Jacquet F, Butault JP, Guichard L. 2011. An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops. *Ecological economics*(70): 1638–1648. doi: 10.1016/j.ecolecon.2011.04.003.

Jeliazkov, A., Mimet, A., Chargé, R., Jiguet, F., Devictor, V., Chiron, F., 2016. Impacts of agricultural intensification on bird communities: New insights from a multi-level and multi-facet approach of biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 9-22.

Jezequel S. *et al.* 2018. Semis Direct sous Couvert Végétal : de nouvelles façons d'expérimenter, avec des agriculteurs acteurs de la recherche, qui ont permis en 4 ans de dégager les principaux facteurs-clés de réussite ou d'échec, Actes du colloque Phloème, 23 et 24 janvier 2018, Cité des Sciences Paris,

Joly, P.B., Matt, M. (2017). "Toward a new generation of research impact assessment approaches", *Journal of Technology Transfer*, DOI 10.1007/s10961-017-9601-0.

Joly, P.B., Matt, M., Gaunand, A., Colinet, L., Larédo, P., Lemarié, S. (2015). ASIRPA : a comprehensive theory-based approach to assess societal impacts of a research organization, *Research Evaluation*, 24 (4), 440-453, doi:10.1093/reseval/rvv015

Justes E., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Fustec J., Hinsinger P., Journet E.-P., Louarn G., Naudin C., Pelzer E., 2014. Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques. *Innovations Agronomiques* 40, 1-24

Justes E., Richard G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. *Innovations Agronomiques* 62, 1-15

Kirk, J. L., Beaudette, L. A., Hart, M., Moutoglis, P., Klironomos, J. N., Lee, H., & Trevors, J. T. (2004). Methods of studying soil microbial diversity. *Journal of microbiological methods*, 58(2), 169-188

Labreuche J. *et al.* 2017 : Impacts de couverts permanents sur le blé tendre d'hiver. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS, Nantes - 8 et 9 novembre 2017

Lamine C (2011) Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *J Rural Stud* 27 (2):209-219. doi:10.1016/j.jrurstud.2011.02.001

- Lothawornkitkul, J., Moore, J. P., Taylor, J. E., Possell, M., Gibson, T. D., Hewitt, C. N., & Paul, N. D. (2008). Discrimination of plant volatile signatures by an electronic nose: a potential technology for plant pest and disease monitoring. *Environmental science & technology*, 42(22), 8433-8439.
- Lareen, A., Burton, F., Schafer, P., 2016. Plant root-microbe communication in shaping root microbiomes. *Plant Molecular Biology* 90, 575-587.
- Leake, J., Johnson, D., Donnelly, D., Muckle, G., Boddy, L., & Read, D. (2004). Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany*, 82(8), 1016-1045.
- Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., Munier-Jolain, N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, 3 (3), 6 p. DOI : 10.1038/nplants.2017.8 [http](http://dx.doi.org/10.1038/nplants.2017.8)
- Lorin M., Jeuffroy M.H., Butier A., Valantin-Morison M., 2015. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. *Eur. J. Agronomy*, 71, 96-105. DOI: 10.1016/j.eja.2015.09.001
- Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Prot.* 27, 1131–1142.
- Magrini MB, Anton M, Chardigny J.M., Duc G., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Micard V., Walrand S., 2018. Pulses for sustainability: breaking agriculture and food sectors out of lock-in. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, in press.
- Mahlein, A. K., Oerke, E. C., Steiner, U., & Dehne, H. W. (2012). Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133(1), 197-209.
- Mailly F., Hossard L., Barbier J.M., Thiollet-Scholtus M., Gary C., 2017. Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *Europ. J. Agronomy* 84 (2017) 23–34
- Massart et al. 2015. Biological control in the microbiome era: Challenges and opportunities. *Biological Control* 89: 98-108
- Matt, M., Colinet, L., Gaunand, A., Joly, P.B. (2017). « Opening the black box of impact – Ideal-type impact pathways in a public agricultural research organization ». *Research Policy*, 46 (1), pp. 207-218,
- McGill B., Enquist B.J., Weiher E., Westoby M., 2006. Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 178-185
- Mehta, Y.R., Riede, C.R., Campos, L.A., Kohli, M.M., 1992. Integrated management of major wheat diseases in Brazil: an example for the southern cone region of Latin America. *Crop Prot.* 11, 517–524.
- Mercer, P.C., Ruddock, A., 2005. Disease management of winter wheat with reduced doses of fungicides in Northern Ireland. *Crop Prot.* 24, 221–228.
- Metcalf, R. L., & Metcalf, E. R. (1992). *Plant kairomones in insect ecology and control*. Chapman and Hall Ltd
- Meynard J.M, Messéan A., Charlier, F., Charrier, M., Fares, M., Le Bail, M.B., Magrini, I., Savini, 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p

- 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. *Agron. Sustain. Development*, 38 :54
- Meynard J.M., Doré T., Lucas P., 2003. Agronomic approach : cropping systems and plant diseases. *C.R. Biologies*, 326, 37-46
- Meynard JM, Girardin P., 1991. Produire autrement. *Courrier de la cellule environnement de l'INRA* 15: 1–19. Disponible sur <http://www7.inra.fr/lecourrier/wp-content/uploads/2012/01/C15Girardin.pdf>.
- Meynard, J. M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., Michon, C. (Auteur de correspondance) (2017). Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agricultural Systems*, 157, 330-339. DOI : 10.1016/j.agsy.2016.08.002
- Meynard, J.M., Dedieu, B., Bos, A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Darnhofer, I., Gibons, D., Dedieu, B. (Eds.), *Farming Systems Research Into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer, pp. 407–432.
- Mundt C.C. (2018) Pyramiding for Resistance Durability: Theory and Practice. *Phytopathology*, 108 (7): 792-802. (<https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0426-RVW>).
- Muneret L., Mitchell M., Seufert V., Aviron S., Djoudi E.A., Pétilion J., Plantegenest M., Thiéry D., Rusch A., 2018. Evidence that organic farming promotes pest control. *Nature Sustainability* 1, 361–368
- Noss, R. F. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation biology*, 4(4), 355-364
- NRC (National Research Council). 2012. *Exposure Science in the 21st Century: A Vision And A Strategy*. Washington, DC:National Research Council. Available: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13507
- Ntzani EE, Chondrogiorgi M, Ntritsos G, Evangelou E, Tzoulaki I, 2013. Literature review on epidemiological studies linking exposure to pesticides and health effects. EFSA supporting publication 2013:EN-497, 159 pp. Available online: www.efsa.europa.eu/publications
- Pelzer, E., Hombert, N., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D. (2014). Meta-Analysis of the Effect of Nitrogen Fertilization on Annual Cereal-Legume Intercrop Production. *Agronomy Journal*, 106 (5), 1775 - 1786. DOI : 10.2134/agronj13.0590
- Poux, X., Aubert, P.-M. (2018). Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. Enseignements d'une modélisation du système alimentaire européen, Iddri-AScA, Study N°09/18, Paris, France, 78 p
- Prost, L., Berthet, E., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., Meynard, J. M. (2017). Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*, 28 (1), 119-129. DOI : 10.1007/s00163-016-0233-4
- Rappaport SM, Smith MT. 2010. Environment and disease risks. *Science* 330:460–461
- Rex Consortium Members (2016) Combining Selective Pressures to Enhance the Durability of Disease Resistance Genes. *Front. Plant Sci.* 7:1916. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01916>).
- 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.
- Sachs, J., Remans, R., Smukler, S., Winowiecki, L., Andelman, S. J., Cassman, K. G., & Jackson, L. E. (2010). Monitoring the world's agriculture. *Nature*, 466(7306), 558.

- Salembier C, Elverdin JH, Meynard JM. 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *ASD V 36*: 1. doi: 10.1007/ s13593-015-0343-9.
- Sankaran, S., Mishra, A., Ehsani, R., & Davis, C. (2010). A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1), 1-13
- Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., & Borozan, V. (2015). Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production*, 88, 297-307.
- Stehle, S., Schulz, R., 2015. Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 112, 5750-5755.
- Stingone JA, Buck Louis GM, Nakayama SF, Vermeulen RCH, Kwok RK, Cui Y, Balshaw DM, Teitelbaum SL. Toward Greater Implementation of the Exposome Research Paradigm within Environmental Epidemiology *Annu. Rev. Public Health* 2017. 38:315–27
- Storkey, J., Meyer, S., Still, K.S., Leuschner, C., 2012. The impact of agricultural intensification and land-use change on the European arable flora. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci.* 279, 1421-1429.
- Swift, M. J., Izac, A. M., & van Noordwijk, M. (2004). Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes—are we asking the right questions?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 113-134.
- Thomazella, D.P.T., Brail, Q., Dahlbeck, D., Staskawicz, B.J. (2016). CRISPR-Cas9 mediated mutagenesis of a DMR6 ortholog in tomato confers broad-spectrum disease resistance. *BioRxiv preprint* (<http://dx.doi.org/10.1101/064824>).
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01014>.
- Tilman, D., Clark, M., 2015. Food, agriculture & the environment: can we feed the world & save the Earth? *Daedalus* 144 (4), 8–23. http://dx.doi.org/10.1162/DAED_a_00350.
- Toffolini Q., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Prost L., 2018. How co-design processes can contribute to and renew relations between scientific knowledge production and innovation? SISA International workshop, 3-7 Nov 2018, Riga
- Tranel, P. J., & Wright, T. R. (2002). Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: what have we learned?. *Weed Science*, 50(6), 700-712.
- Trasande, L., Zoeller, R.T., Hass, U., Kortenkamp, A., Grandjean, P., Myers, J.P., DiGangi, J., Hunt, P.M., Rudel, R., Sathyanarayana, S., Bellanger, M., Hauser, R., Legler, J., Skakkebaek, N.E., Heindel, J.J., 2016. Burden of disease and costs of exposure to endocrine disrupting chemicals in the European Union: an updated analysis. *Andrology* 4, 565-572.
- Tsiafouli, M.A., Thebault, E., Sgardelis, S.P., de Ruiter, P.C., van der Putten, W.H., Birkhofer, K., Hemerik, L., de Vries, F.T., Bardgett, R.D., Brady, M.V., Bjornlund, L., Jorgensen, H.B., Christensen, S., D' Hertefeldt, T., Hotes, S., Hol, W.H.G., Frouz, J., Liiri, M., Mortimer, S.R., Setälä, H., Tzanopoulos, J., Uteseny, K., Pizl, V., Stary, J., Wolters, V., Hedlund, K., 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob. Change Biol.* 21, 973-985.
- Vanloqueren, G., & Baret, P. V. (2008). Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural 'lock-in' case study. *Ecological Economics*, 66(2-3), 436-446. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.10.007

Vemmer & Patel, 2013. Review of encapsulation methods suitable for microbial biological control agents. *Biological Control* 67: 380-389.

Verret, V., Gardarin, A., Makowski, D., Lorin, M., Cadoux, S., Butier, A., Valantin-Morison, M. (2017). Assessment of the benefits of frost-sensitive companion plants in winter rapeseed. *European Journal of Agronomy*, 91, 93- 103. DOI : 10.1016/j.eja.2017.09.006

Verret, V., Gardarin, A., Pelzer, E., Médiène, S., Makowski, D., 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

Wezel A., Bellon S., Doré, T., Francis C., Vallod D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. *A review. Agronomy Sustainable Development* 29, 503-515

Wild CP. 2005. Complementing the genome with an “exposome”: the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 14:1847–1850.

Wilson, C., & Tisdell, C. (2001). Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. *Ecological Economics*, 39(3), 449-462. doi: 10.1016/s0921-8009(01)00238-5



Document coordonné par Florence Jacquet, Inra et Christian Huyghe, Directeur Scientifique Agriculture, Inra
Février 2019

DOI : 10.15454/1.5531779964871863e12

Licence CC : BY NC ND

Pour citer ce document :

Jacquet F., Huyghe C., Barouki R., Barraquand F., Bertrand C., Côte F., Cravedi J-P., Fontaine L., Jeuffroy M-H., Labarthe P., Lebeau F.,
Le Cadre E., Lesprit E., Litrico I., Malausa T., Profizi C., Reboud X., Roth C., Vissac P., Watteyne T. (2019)
Propositions pour un programme prioritaire de recherche. Cultiver et protéger autrement, Inra, 92p.