



CULTIVER  
PROTÉGER  
*autrement*

# Quels leviers pour une agriculture sans pesticides ?

Résultats à mi-parcours  
du Programme Prioritaire de Recherche  
Cultiver et Protéger Autrement

### **Production**

Programme Prioritaire de Recherche (PPR) Cultiver et Protéger Autrement  
Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)  
147, rue de l'Université  
75 338 Paris cedex 07

### **Réalisation et coordination**

Laure Latruffe, Directrice Scientifique du PPR Cultiver et Protéger Autrement  
Myriam Tisserand, Manageuse du PPR Cultiver et Protéger Autrement

### **Pilotage et contribution scientifique**

**PPR Cultiver et Protéger Autrement** - Christian Huyghe, Laure Latruffe, Myriam Tisserand

**BE CREATIVE** - Lorène Prost, Muriel Valantin-Morison, Rosan De Lange

**BEYOND** - Cindy Morris, Samuel Soubeyrand, Claire Nédellec, Nicolas Sauvion

**CAP ZERO PHYTO** - Marie-Noëlle Brisset, Bernard Caromel, Hélène Gautier, Julie Borg, Caroline Caporalino, Alan Kergunteuil, Laure Perchepied

**DEEP IMPACT** - Christophe Mougel

**FAST** - Julie Subervie

**MOBIDIV** - Aline Fugerey-Scarbel, Jérôme Enjalbert, Jean-Benoît Morel, Philippe Martin, Elodie Yan, Nathalie Moutier, Timothée Flutre, Stéphane Lemarié

**PHEROSENSOR** - Philippe Lucas, Emmanuel Scorsone, Emmanuelle Jacquin-Joly, Camille Meslin, Simon Labarthe

**SPECIFICS** - Judith Burstin, Stéphane Cordeau, Sandie Barbot, Marie-Benoît Magrini, Marie-Laure Pilet-Nayel, Guenaëlle Hellou, Maé Guinet, Baptiste Imbert

**SUCSEED** - Matthieu Barret, Jérôme Verdier, Marie Simonin, Loïc Rajjou

**VITAE** - François Delmotte, Marielle Adrian, Hervé Hannin, Léa Cabrol-Froget, Corinne Vacher, Simon Labarthe, Pere Mestre, Adrien Rusch, Laure Latruffe, Laurent Delière, Philippe Darriet, Anne Mérot, Eric Giraud-Héraud

### **Coordination graphique**

Myriam Tisserand, Manageuse du PPR Cultiver et Protéger Autrement  
Camille Lamy, Chargée de communication de l'unité d'appui aux PPR et PEPR d'INRAE

### **Création graphique**

Christophe Laye  
COPYTOP  
5, rue Jean Mermoz  
75 008 Paris

### **Pour citer ce document :**

Latruffe, L., Tisserand, M. (coord.) 2024. Quels leviers pour une agriculture sans pesticides ? Résultats à mi-parcours du Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement ».

*Remerciements adressés à tous les membres de la communauté scientifique du PPR Cultiver et Protéger Autrement qui ont participé de près ou de loin aux avancées des recherches, aux équipes des projets et des études du programme, au comité d'animation scientifique du programme et à l'unité d'appui aux PPR et PEPR d'INRAE.*

# SOMMAIRE

<b>Avant-propos</b>	<b>P.05</b>
<b>Le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement »</b>	<b>P.06</b>
<b>Les projets</b>	
BE CREATIVE, Co-concevoir des territoires sans pesticides	<b>P.09</b>
BEYOND, Tendre vers une épidémiologie et une prophylaxie fondées sur des observations de proximité et à distance	<b>P.15</b>
CAP ZERO PHYTO, Renforcer l'immunité des cultures fruitières et maraîchères par des combinaisons de leviers	<b>P.23</b>
DEEP IMPACT, Analyser les interactions plante-microbiote pour promouvoir la défense des plantes aux bioagresseurs	<b>P.31</b>
FAST, Faciliter l'action publique pour sortir des pesticides	<b>P.39</b>
MOBIDIV, Mobiliser et sélectionner la diversité cultivée pour un changement systémique vers une agriculture sans pesticides	<b>P.47</b>
PHEROSENSOR, Détecter de façon précoce les insectes ravageurs à l'aide de capteurs olfactifs utilisant des récepteurs phéromonaux	<b>P.55</b>
SPECIFICS, Concevoir et développer des systèmes de culture sans pesticides et riches en légumineuses à graines	<b>P.61</b>
SUCSEED, Mettre fin à l'utilisation des pesticides sur les semences et proposer des solutions alternatives	<b>P.71</b>
VITAE, Cultiver la vigne sans pesticides : vers des socio-écosystèmes viticoles agroécologiques	<b>P.79</b>



## AVANT-PROPOS

Le contexte national et européen, tant agricole et alimentaire que sociétal et environnemental, sur le champ des pesticides et de la protection des cultures est tendu et compliqué.

Des changements profonds sont nécessaires en raison des impacts non soutenables sur la santé et l'environnement d'un certain nombre de matières actives, du nombre croissant de bioagresseurs devenus résistants.

Il est absolument impératif de mettre à la disposition de toutes les filières des innovations, tant biotechniques qu'organisationnelles, qui mobilisent l'ensemble des principes de la protection intégrée des cultures. Différents programmes, nationaux et européens, y contribuent avec l'objectif d'un transfert aussi rapide que possible vers les agriculteurs. Les avancées très rapides de la connaissance permettent aujourd'hui d'ouvrir des perspectives nouvelles particulièrement prometteuses. Le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement », en posant un scénario non-prescriptif particulièrement exigeant a contribué à aborder avec beaucoup d'ambition ces fronts de recherche. Les premières productions très riches des 10 projets de ce programme sont présentées ici. Le relais sur le chemin vers l'impact est pris par les Grands Défis, par les dispositifs inscrits dans Ecophyto et par les approches nouvelles de « problem-solving ».

Ceci permet de mesurer l'intensité des efforts de recherche fondamentale et recherche appliquée qui sont faits pour apporter des solutions durables, ainsi que la cohérence globale de notre dispositif national qui mobilise tous les acteurs.

**Christian Huyghe,**

Directeur Scientifique Agriculture d'INRAE.

# LE PROGRAMME PRIORITAIRE DE RECHERCHE « CULTIVER ET PROTÉGER AUTREMENT »

## ► Contexte

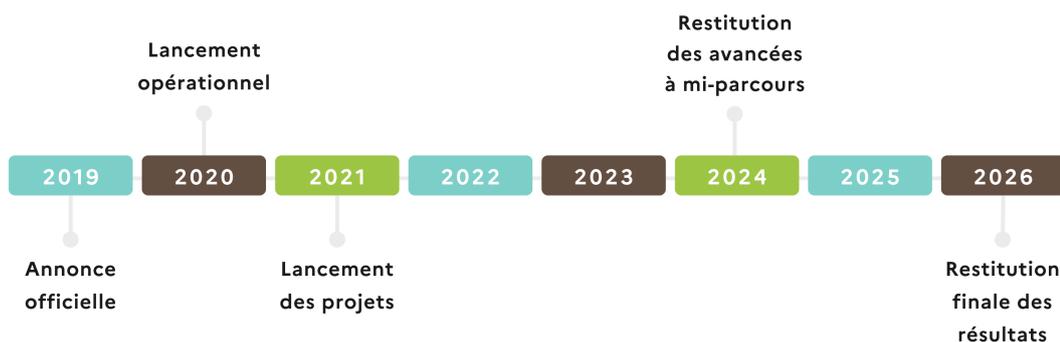
Une réduction massive de l'utilisation des pesticides en agriculture requiert de mobiliser la transition agroécologique pour favoriser la protection durable des écosystèmes et la préservation de la biodiversité. La recherche et l'innovation jouent un rôle clé pour répondre à ces enjeux.

Le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement » contribue aux défis majeurs de l'agriculture, en soutenant la production de connaissances de rupture pour permettre l'émergence d'une agriculture performante et sans pesticides.

Dans le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement », le terme « pesticides » désigne les pesticides de synthèse, ainsi que les pesticides naturels ayant un impact significatif sur l'environnement et la santé humaine<sup>1</sup>.

Lancé officiellement en 2019 par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) et par le Secrétariat Général Pour l'Investissement (SGPI), ce programme est doté de 30 millions d'euros pour une durée de 6 ans, avec l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) en charge du pilotage scientifique.

Dans ce contexte, depuis 2021 dix projets de recherche déploient des approches de recherche pluridisciplinaires et innovantes, tout en évaluant les changements socio-économiques nécessaires pour soutenir la transition agroécologique au bénéfice des agriculteurs et de la société. En parallèle, une animation scientifique et des outils structurants mis en place par le programme viennent assurer la concrétisation des objectifs et le développement des leviers d'actions.



## ▲ Chronologie du Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement ».

© Myriam Tisserand.

<sup>1</sup> Florence Jacquet, Marie-Helene Jeuffroy, Julia Jouan, Edith Le Cadre, Thibaut Malausa, Xavier Reboud, et Christian Huyghe (coord.). *Zéro pesticide : un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*, Éditions Quae, Collection Synthèses, 2022. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3311-3>.

## ► Leviers d'action ciblés par le programme

### - Promouvoir la prophylaxie

La protection des cultures se base majoritairement sur des approches curatives lorsque le bioagresseur est visible, ou en application systématique. Un effort de recherche ciblé sur l'épidémiosurveillance est mené dans le programme afin de rendre possible la démarche préventive d'anticipation de l'émergence des bioagresseurs, sur laquelle repose la prophylaxie, et ainsi d'abaisser la pression de bioagresseurs sous les seuils de nuisibilité. Deux projets du programme sont ainsi entièrement consacrés à la surveillance épidémiologique des cultures dans le but de mettre en place une évaluation des risques s'appuyant sur un panel d'indicateurs et des technologies de pointe.

### - S'appuyer sur l'agroécologie

L'agroécologie fait appel à l'agronomie et aux sciences écologiques. Elle s'appuie également sur les sciences économiques et sociales pour soutenir la conception et la gestion d'agroécosystèmes durables. L'un de ses principes de base est d'accroître la biodiversité fonctionnelle afin de bénéficier des régulations biologiques et des services écosystémiques. Au travers d'une approche interdisciplinaire, les projets travaillent sur les différentes dimensions agroécologiques, à diverses échelles spatiales et temporelles.

### - Mobiliser tous les acteurs des chaînes de valeur

La diffusion des innovations représente un élément clé de la transition agroécologique car elle contribue à la généralisation des pratiques et systèmes innovants chez les agriculteurs. La diversification des productions requiert la création de marchés et des chaînes de transformation adaptées. La promotion des produits issus d'une agriculture sans pesticides nécessite également une reconnaissance de ces produits par le consommateur. Dans le même temps, une évolution des politiques publiques est essentielle pour accompagner ce changement. Dans le cadre du programme, plusieurs projets intègrent des recherches sur les déterminants socio-économiques de la transition et sur les solutions politiques et organisationnelles, et un projet y est entièrement dédié.

## ► Animation scientifique et événements annuels

Chaque année, le programme organise une Rencontre Chercheurs – Professionnels à destination d'une filière (arboriculture, grandes cultures, viticulture, en ce qui concerne les Rencontres passées) pour favoriser les échanges avec la profession agricole, permettre aux acteurs de suivre les avancées de la recherche, et promouvoir les initiatives locales.

A l'international, des workshops (ateliers) scientifiques sur des thèmes d'intérêt du programme sont organisés chaque année. Ces rendez-vous à destination de la communauté scientifique ont pour objectifs de renouveler les approches scientifiques et de partager la vision du programme.

En parallèle, la réalisation de deux ouvrages publiés aux éditions Quae, l'un en français et l'autre en anglais, permet de



▲ **Zéro pesticide : Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable.**

dresser l'état des lieux des recherches et des pistes envisagées pour une agriculture performante et sans pesticides. Les deux ouvrages sont disponibles en libre accès en version numérique.

## ► Outils structurants

Une étude prospective « Agriculture européenne sans pesticides chimiques en 2050 », restituee en 2022, a permis de construire des scénarios de projection qui ont alimenté un exercice de modélisation à l'horizon 2050. Cet exercice s'est également appuyé sur les hypothèses et les résultats attendus des dix projets du programme, et sur des synthèses des connaissances scientifiques. Cette prospective a ainsi permis de s'interroger sur les trajectoires futures de transformation de l'agriculture européenne.

Un autre outil structurant est l'évaluation des impacts des recherches du programme suivant une méthode permettant d'analyser les retombées de la recherche. Au sein du programme, cette méthode est appliquée en temps réel afin d'identifier au mieux les difficultés et réajuster les modes d'action si nécessaire.

## ► Exemples d'impacts attendus

- Des connaissances mobilisables par les agriculteurs en agroécologie.
- De nouvelles sources et de nouveaux mécanismes de résistance génétique.
- Le développement de méthodes et de produits de biocontrôle, leur intégration dans les systèmes de culture et leur accessibilité sur le marché.
- Une capacité des acteurs de R&D et du conseil agricole à promouvoir les connaissances et à accompagner les producteurs.



# BE CREATIVE - CO-CONCEVOIR DES TERRITOIRES SANS PESTICIDES

## ► Contexte

Pour faire face aux enjeux actuels et futurs, il devient urgent de repenser notre rapport à l'agriculture et à l'environnement. La transition agroécologique ne peut s'opérer sans un changement profond de regard, pour que les systèmes agricoles ne soient plus considérés comme de simples outils de production, mais comme des socio-écosystèmes complexes, à nourrir et préserver.

Ce changement de paradigme invite à questionner nos pratiques, nos modèles économiques et notre vision du progrès, pour concevoir une agriculture plus respectueuse de l'environnement et des dynamiques sociales.

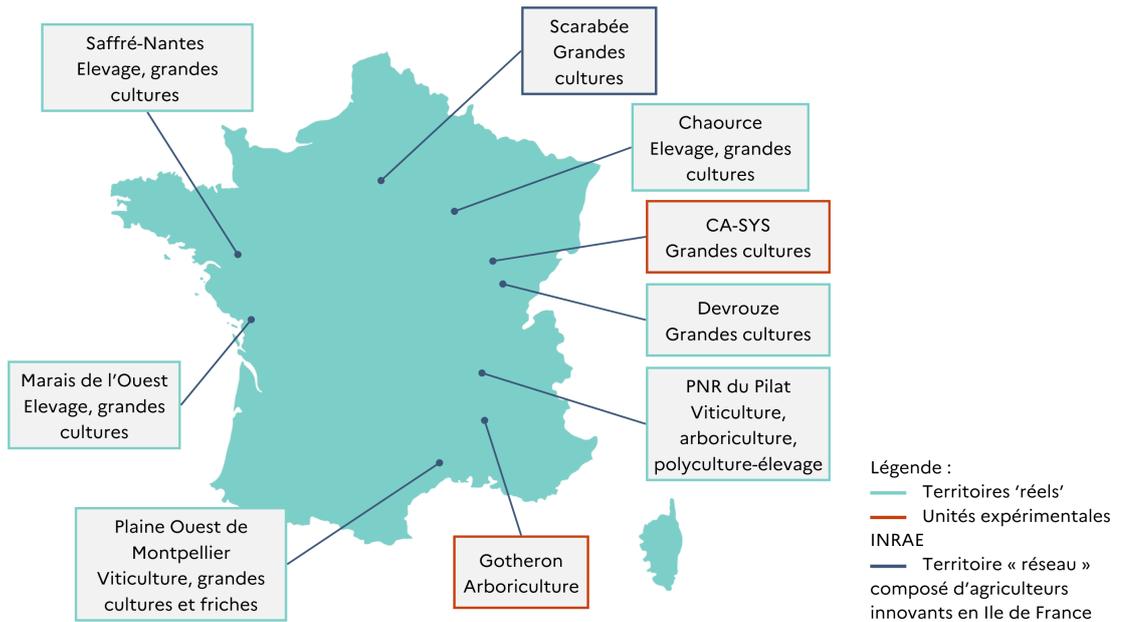
C'est pourquoi, le projet **BE CREATIVE** développe une approche innovante de co-conception avec et pour les acteurs des territoires, dans le but de générer des connaissances scientifiques pour accompagner la transition agroécologique vers des territoires sans pesticides. Il s'agit de penser de façon disruptive les dynamiques écologiques, socio-économiques et techniques nécessaires à cette transition. Le projet développe des recherches :

1. Pour comprendre les enjeux de la conception dans chaque territoire,
2. Pour soutenir la créativité et concevoir des solutions agronomiques, écologiques, économiques ou organisationnelles,
3. Pour évaluer la capacité des systèmes innovants et des configurations territoriales à concilier performance agronomique, socio-économique et environnementale au niveau du champ, du paysage et du territoire.

## ► Stratégies déployées

### Organisation et approches communicantes

**BE CREATIVE** rassemble 9 territoires-cas d'étude. Chaque territoire est suivi et accompagné par un porteur académique en lien avec un porteur local du territoire. Ce dispositif assure une diversité de contextes pédoclimatiques et agricoles, mais implique des points de départ et d'arrivée différents selon les territoires.



### ▲ Les territoires-études du projet BE CREATIVE.

© Lorène Prost, Muriel Valantin-Morison, Rosan De Lange, Myriam Tisserand.

Le projet déploie trois approches pour : « Comprendre », « Créer » et « Evaluer » des territoires sans pesticides. Ces approches communiquent entre elles et génèrent des connaissances qui s'enrichissent mutuellement :

1. Les diagnostics menés mettent en évidence les possibilités d'innovation et les verrouillages.
2. En retour, les solutions développées ont un impact sur la dynamique des territoires analysés.
3. L'évaluation des solutions imaginées aide ensuite à nourrir la créativité des acteurs qui oriente les besoins de l'évaluation.



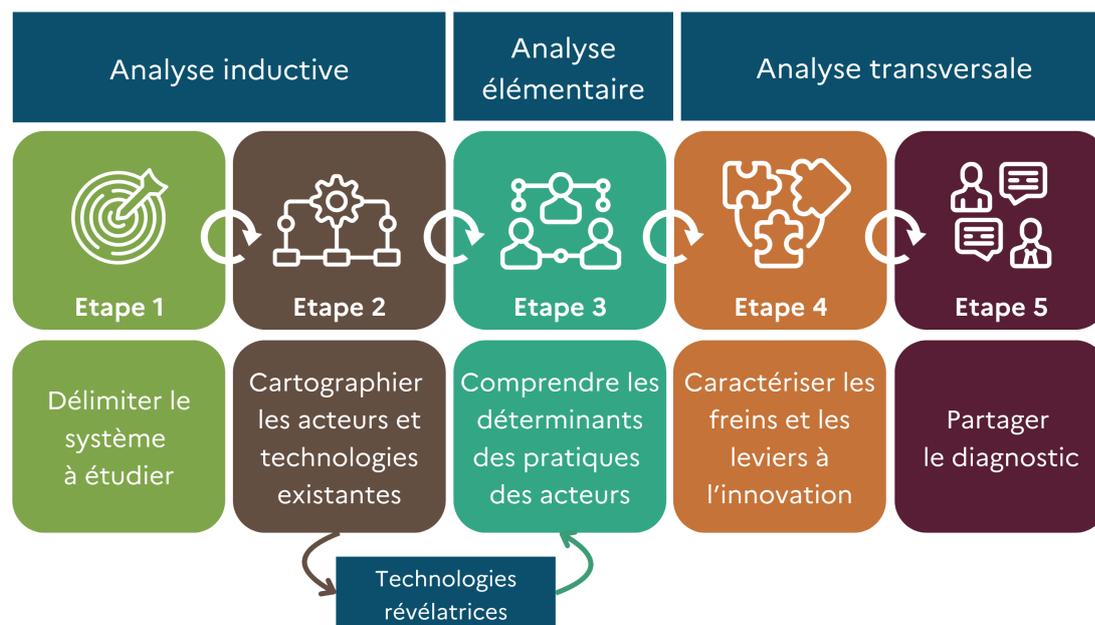
### ▲ Approches combinées du projet BE CREATIVE.

© Lorène Prost, Muriel Valantin-Morison, Rosan De Lange, Myriam Tisserand.

## Focus sur la méthode du diagnostic sociotechnique

Pour « Comprendre » et pour l'analyse des enjeux de conception, le projet participe au développement d'une démarche de diagnostic sociotechnique reposant sur 3 phases de recueil et d'analyse des données, qui se décomposent en 5 étapes.

Les 3 phases de la démarche suivent une logique chronologique. Dans la pratique, il est cependant fréquent de faire des allers-retours entre les différentes phases et étapes, de façon itérative<sup>1</sup>.



### ▲ Les 3 phases et les 5 étapes de la démarche du diagnostic sociotechnique<sup>1</sup>.

© Marion Casagrande, Myriam Tisserand.

## ► Avancées

### Mieux comprendre

Depuis 2021, 6 diagnostics sociotechniques ont été réalisés sur les territoires 'réels' et 1 diagnostic 'filrière' sur le territoire de Gotheron. Un guide du diagnostic sociotechnique a été produit et est accessible en accès ouvert.

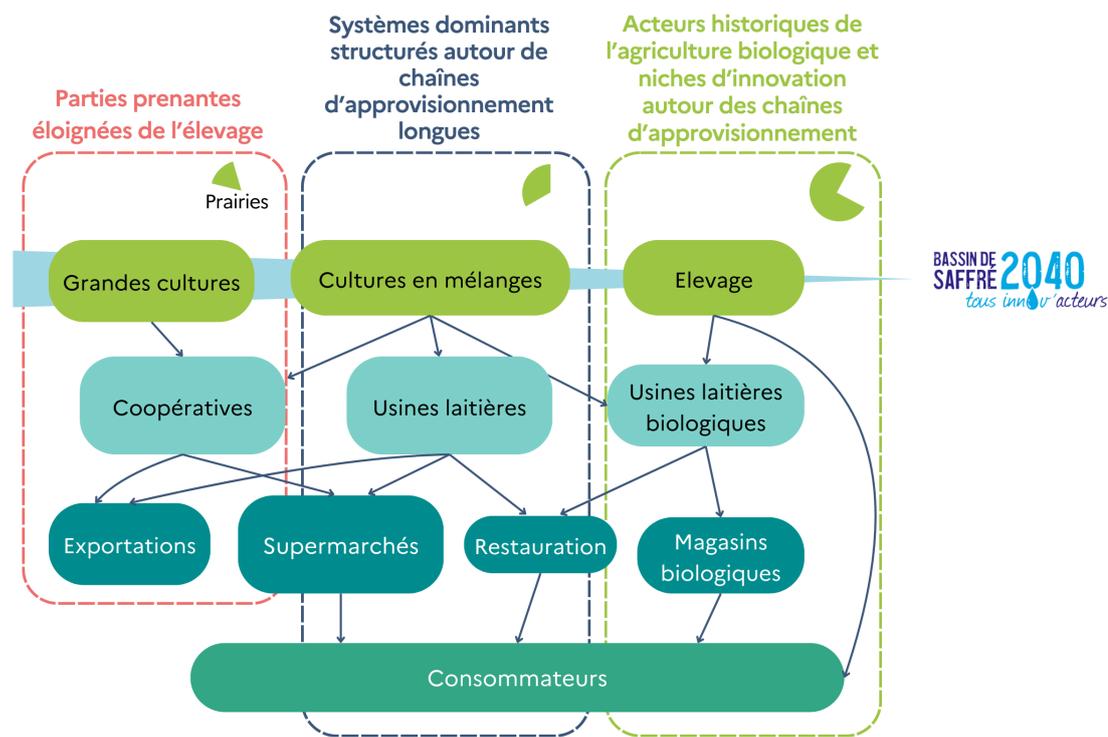
**Exemple du cas du territoire Saffré-Nantes :** le diagnostic sociotechnique réalisé sur le territoire Saffré-Nantes a démontré plusieurs atouts (comme une part importante de prairies et d'exploitations en agriculture biologique sur le territoire) et menaces (diminution des surfaces enherbées au profit de cultures plus consommatrices de pesticides et stagnation des conversions en agriculture biologique). La cartographie synthétique positionne les groupes d'acteurs (de la production à la consommation) selon leur

Le diagnostic sociotechnique (DST) est une démarche pour identifier les facteurs techniques, cognitifs, économiques, politiques, et sociaux qui permettent de décrire la situation et d'identifier les freins et les leviers au processus d'innovation dans les systèmes agri-alimentaires. Ces freins, de natures diverses, sont souvent combinés, conduisant à un phénomène de verrouillage. Le DST peut être réalisé sur l'ensemble des filières présentes sur un territoire ou en ciblant certaines filières.

<sup>1</sup> D'après Casagrande et al., 2023, « Guide méthodologique pour le diagnostic des freins et leviers sociotechniques aux processus d'innovation dans des systèmes agri-alimentaires ».

distance aux objectifs de la charte « tous innEAUv'acteurs » portée par Atlantic'eau, porteur local du territoire de Saffré-Nantes au sein du projet **BE CREATIVE**, visant le non-usage de produits phytosanitaires de synthèse sur le bassin.

Les travaux réalisés sur ce territoire ont allié des étapes d'exploration par scénarisation avec l'outil Co-click'eau, avec des étapes d'entretiens pour cerner les contraintes et leviers du territoire, et avec des ateliers de conception sur des cibles d'innovation plus restreintes : réduire les herbicides/favoriser le maintien de l'élevage<sup>2</sup>.



▲ **Cartographie simplifiée des systèmes sociotechniques identifiés dans le bassin de Saffré-Nantes<sup>2</sup>.**

© Rémy Ballot, Claire Bernardin, Marion Casagrande, Marianne Duncombe, Blanche Flipo, Marie-Hélène Jeuffroy, Laura Le Du, Myriam Tisserand.

Plusieurs stratégies sont aujourd'hui mises en œuvre sur le territoire de Saffré-Nantes pour lever la dépendance aux pesticides, ce qui dessine une approche globale de cette problématique. Ainsi, le territoire de Saffré-Nantes mobilise à la fois des leviers en amont, avec des actions sur les pratiques culturales des fermes (par exemple : désherbage mécanique, adaptation des rotations), et en aval, avec des actions visant à créer des marchés plus rémunérateurs en agriculture biologique. De plus, un grand nombre de leviers liés aux acteurs portant des enjeux de réduction de pesticides sont mobilisés, par des actions de sensibilisation, de financement et d'accompagnement (par exemple : lettre d'information aux habitants, groupement des agriculteurs biologiques, conditions de transmission des exploitations).

### Accompagner les territoires

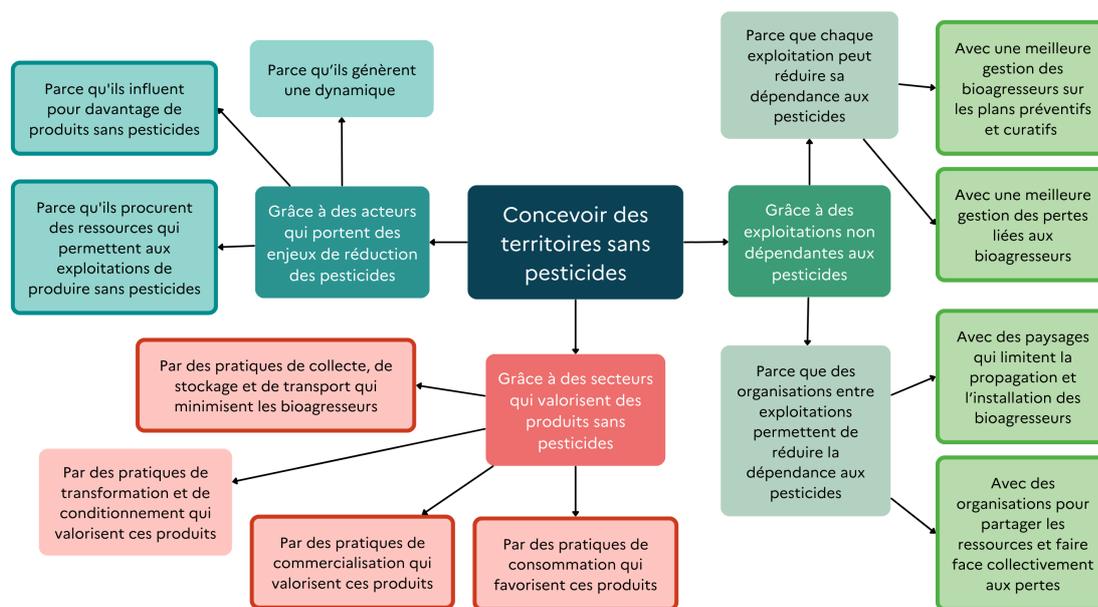
Des animations communes sous forme de webinaires de partage d'expériences sont proposées dans les territoires afin d'avancer conjointement sur les méthodes à déployer dans ces territoires pour tendre vers un non-usage des pesticides. Des formations ont également été

<sup>2</sup> D'après Ballot et al., 2024, « Des freins de la spécialisation aux opportunités de la diversification pour un territoire sans pesticides ».

suivies par les acteurs de territoires et des outils de scénarisation sont actuellement testés pour se projeter dans le monde sans pesticides (Co-click'eau, Maelia, ...).

## Concevoir et évaluer avec les territoires

Différentes stratégies ont été testées dans chaque territoire pour lever la dépendance aux pesticides : à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation au travers de choix de diversification des cultures ou au travers du maintien de l'élevage à l'herbe, à l'échelle du territoire au travers du développement de filières plus rémunératrices ou de pratiques agroécologiques déployées à l'échelle paysagère. Cette diversité d'approches est une richesse pour le projet et une source importante d'échanges et d'apprentissages collectifs.



### ▲ Arbre des stratégies.

© Rémy Ballot, Claire Bernardin, Marion Casagrande, Marianne Duncombe, Blanche Flipo, Marie-Hélène Jeuffroy, Laura Le Du, Myriam Tisserand.

Les stratégies privilégiées par le territoire de Saffré-Nantes sont indiquées par les encadrements.

## ► Perspectives

Le projet **BE CREATIVE** ouvre une voie innovante vers des territoires sans pesticides, en mobilisant une large diversité d'acteurs et en développant des stratégies à l'écoute des territoires. Cette approche participative permet de combiner des connaissances scientifiques, des innovations techniques, et des dynamiques collectives pour identifier et évaluer des leviers adaptés aux différents contextes, tout en renforçant les réseaux d'acteurs engagés dans la transition agroécologique.

Les premières avancées témoignent de la pertinence de développer des méthodes et d'encourager les synergies entre les acteurs locaux et les chercheurs. Les territoires ont avancé dans l'élaboration :

- 1) Des initiatives à l'œuvre sur ces territoires, contribuant à un objectif de réduction forte de l'usage des pesticides.
- 2) Des réseaux d'acteurs qui s'organisent autour de ces initiatives.

Les acteurs impliqués réfléchissent aujourd'hui à la manière de contribuer à ces initiatives : y a-t-il des stratégies de conception à renforcer, à faire exister, à soutenir, à dégrossir ? Des dynamiques de conception sont en cours sur les territoires avec des stratégies très diversifiées pour atteindre le même objectif de territoire sans pesticides. Les prochaines étapes consisteront donc à approfondir ces stratégies de conception collective, à affiner les solutions déployées et à évaluer les impacts à long terme.

## ► Références

- Remy Ballot, Claire Bernardin, Marion Casagrande, Marianne Duncombe, Blanche Flipo, Marie-Hélène Jeuffroy, et Laura Le Du. « Des freins de la spécialisation aux opportunités de la diversification pour un territoire sans pesticides ». *Innovations Agronomiques* 93 (2024). <https://doi.org/10.17180/ciag-2024-vol93-art09>.
- Marion Casagrande, Raphael Belmin, Yann Boulestreau, Marianne Le Bail, Mireille Navarrete, et Jean-Marc Meynard. « Guide méthodologique pour le diagnostic des freins et leviers sociotechniques aux processus d'innovation dans des systèmes agri-alimentaires » (2023). <https://doi.org/10.17180/w78m-dn95>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Lorène Prost ([lorene.prost@inrae.fr](mailto:lorene.prost@inrae.fr)) et Muriel Valantin-Morison ([muriel.morison@inrae.fr](mailto:muriel.morison@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/be-creative>

### Les territoires et leurs porteurs académiques

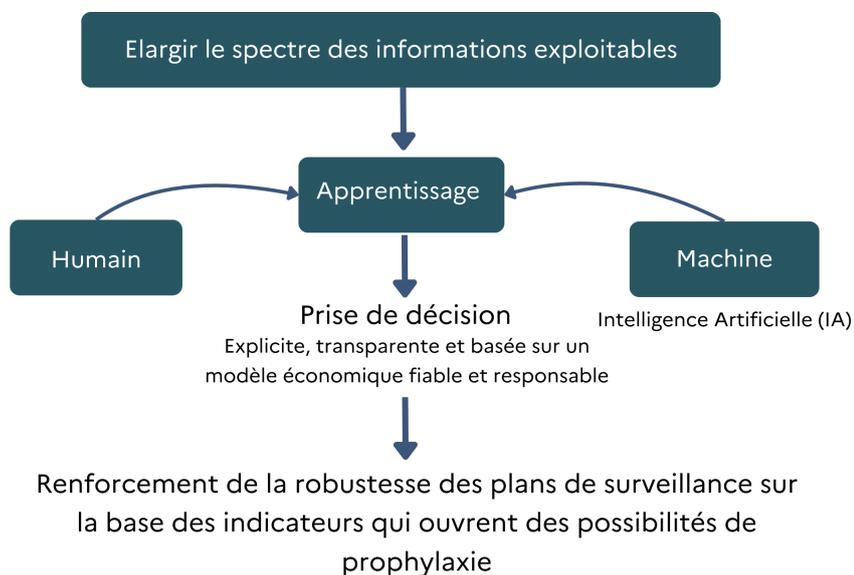
- Chaource : Solène Pissonnier ([solene.pissonnier@agroparistech.fr](mailto:solene.pissonnier@agroparistech.fr))
- Saffré-Nantes : Rémy Ballot ([remy.ballot@inrae.fr](mailto:remy.ballot@inrae.fr))
- Devrouze : Olivier Réchauchère ([olivier.rechauchere@inrae.fr](mailto:olivier.rechauchere@inrae.fr))
- CA-SYS : Violaine Deytieux ([violaine.deytieux@inrae.fr](mailto:violaine.deytieux@inrae.fr))
- Scarabée : Antoine Gardarin ([antoine.gardarin@inrae.fr](mailto:antoine.gardarin@inrae.fr))
- Marais de l'Ouest : Raymond Reau ([raymond.reau@inrae.fr](mailto:raymond.reau@inrae.fr)), Anne Farrugia ([anne.farrugia@inrae.fr](mailto:anne.farrugia@inrae.fr))
- Plaine Ouest de Montpellier : Marc Moraine ([marc.moraine@inrae.fr](mailto:marc.moraine@inrae.fr))
- Parc Naturel Régional (PNR) du Pilat : Florian Célette ([fcelette@isara.fr](mailto:fcelette@isara.fr)) et Hélène Brives ([hbrives@isara.fr](mailto:hbrives@isara.fr))
- Gotheron : Sylvaine Simon ([sylvaine.simon@inrae.fr](mailto:sylvaine.simon@inrae.fr)), Solène Borne ([solene.borne@inrae.fr](mailto:solene.borne@inrae.fr)), Aude Alaphilippe ([aude.alaphilippe@inrae.fr](mailto:aude.alaphilippe@inrae.fr))

# BEYOND – TENDRE VERS UNE ÉPIDÉMIOLOGIE ET UNE PROPHYLAXIE FONDÉES SUR DES OBSERVATIONS DE PROXIMITÉ ET À DISTANCE

## Contexte

La surveillance épidémiologique est essentielle pour anticiper et maîtriser les risques sanitaires. Cependant, face aux observations de données directes, les perspectives de réactivité et la marge de manœuvre disponibles restent faibles et s'accompagnent souvent d'un recours aux pesticides pour le maintien de la culture. La transition vers des pratiques agroécologiques nécessite des indicateurs de risque à des échelles de temps et d'espace plus étendues.

Le projet **BEYOND** se concentre sur l'amélioration des stratégies de surveillance épidémiologique pour la santé des plantes en proposant de nouveaux types de plans de surveillance. L'objectif est de concevoir de nouveaux indicateurs de risque de maladie mettant en synergie des connaissances de diverses disciplines et s'appuyant sur diverses sources de données de prédiction.



### ▲ Objectifs du projet BEYOND.

© Cindy Morris, Samuel Soubeyrand, Myriam Tisserand.

## Stratégies déployées

En santé des cultures, l'épidémiologie vise à surveiller le développement des bioagresseurs afin de mieux anticiper les risques et de mettre en place des actions de protection efficaces en favorisant des mesures préventives.

Le projet **BEYOND** s'appuie sur le concept « One Health » (Une seule santé) pour aborder des défis clés : l'identification des réservoirs de pathogènes, l'analyse des voies de dissémination, l'adaptation des prévisions au changement climatique et la création d'outils et de données interopérables pour différents types de maladies. Cette démarche nécessite également une collaboration multi-acteurs. Le projet mobilise ainsi des scientifiques de diverses disciplines (sciences de la vie, mathématiques et informatique, sciences sociales) pour mieux maîtriser la propagation des organismes (pathogènes, insectes), dans le but d'anticiper les épidémies, de mieux les surveiller et d'approfondir notre compréhension des voies de dissémination de ces organismes en vue d'une gestion proactive des épidémies.

### Anticiper l'arrivée à longue distance des pathogènes

Pourriture brune du pêcher ; Sharka des *Prunus* ; Mosaïque jaune de la courgette ; Huanglongbing (HLB) des agrumes ; "Zebra chip" de la pomme de terre ; Oïdium de la tomate

### Étendre la connaissance des réservoirs de pathogènes

Oïdium de la tomate ; Chancres bactériens du kiwi et de l'abricot

### Créer des indicateurs multidimensionnels

Flavescence dorée de la vigne



### Développer des cartes de risque

Chancres bactériens du kiwi et de l'abricot ; *Xylella fastidiosa* ; Pourriture brune de l'ail ; phytoplasmes à transmission vectorielle

### Cartographier les flux commerciaux de plantes

ToBRFV de la tomate ; Mosaïque jaune de la tomate, du poivron et des cucurbitacées (divers virus) ; Sharka des *Prunus*.

### Optimiser l'utilisation des données aériennes

Mildiou et pourriture noire de la vigne

### ▲ Divers pathosystèmes d'étude au service des différentes approches déployées par le projet BEYOND.

© Cindy Morris, Samuel Soubeyrand, Myriam Tisserand.

15 pathosystèmes sont étudiés par le projet. Ils représentent une gamme de cultures principalement horticoles associées à leurs pathogènes respectifs ainsi qu'à différents modes de dissémination (vent, eau, insectes vecteurs et/ou échange de matériel végétal ou depuis le sol).



### 1. Organiser et faire dialoguer les stratégies développées dans le projet

Identification des besoins, des obstacles à l'acquisition de données. Formations à l'interdisciplinarité, diffusion des résultats.



### 2. Créer un système d'information pour centraliser, intégrer et fournir des données épidémiologiques et environnementales à la demande

Diverses méthodes (text mining, statistiques spatiales, ...) pour produire et gérer des données (enquêtes, images satellites, capteurs) et alimenter des outils d'analyse décisionnelle.



### 3. Adapter l'analyse des réseaux pour identifier de nouveaux indicateurs et stratégies d'échantillonnage

Analyses de réseaux modélisant la propagation des agents pathogènes pour élaborer des stratégies de surveillance tenant compte des contraintes de temps et de ressources.



### 4. Développer une approche d'apprentissage pour créer un système de surveillance basé sur des données hétérogènes

Création de cartes de risques, application de l'Intelligence Artificielle pour ajuster la collecte de données et concevoir des stratégies prophylactiques.



### 5. Comprendre la prise de décisions des parties prenantes sur la gestion des bioagresseurs

Modèles bioéconomiques pour optimiser la surveillance épidémiologique et simulations de l'impact des changements.



### 6. Élaborer des lignes directrices pour la surveillance à différentes échelles, applicables à divers pathosystèmes

Révision des méthodes de détection, identification de nouveaux indicateurs, et conception de plans de surveillance.

## ▲ Les stratégies développées par le projet BEYOND.

© Cindy Morris, Samuel Soubeyrand, Myriam Tisserand.

### Focus : Créer un système d'information pour centraliser, intégrer et fournir des données épidémiologiques et environnementales

Dans cette optique, la prévision du mouvement des masses d'air troposphériques apparaît comme un élément crucial, car elle permet d'estimer la propagation des organismes. L'application Tropolink, mise en place par le projet, vise à générer des matrices de connectivité basées sur le mouvement des masses d'air dans la troposphère, et ainsi mettre en réseaux les sites géographiques.

En parallèle, l'analyse en temps réel de médias internationaux par le biais de la Plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale (ESV), dispositif français dédié à la surveillance des maladies et des ravageurs des plantes, permet de recueillir des observations en temps réel sur les organismes et les interactions biologiques. Cette approche va au-delà de la simple collecte de documents et intègre l'extraction d'informations structurées à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle telles qu'AlvisNLP.

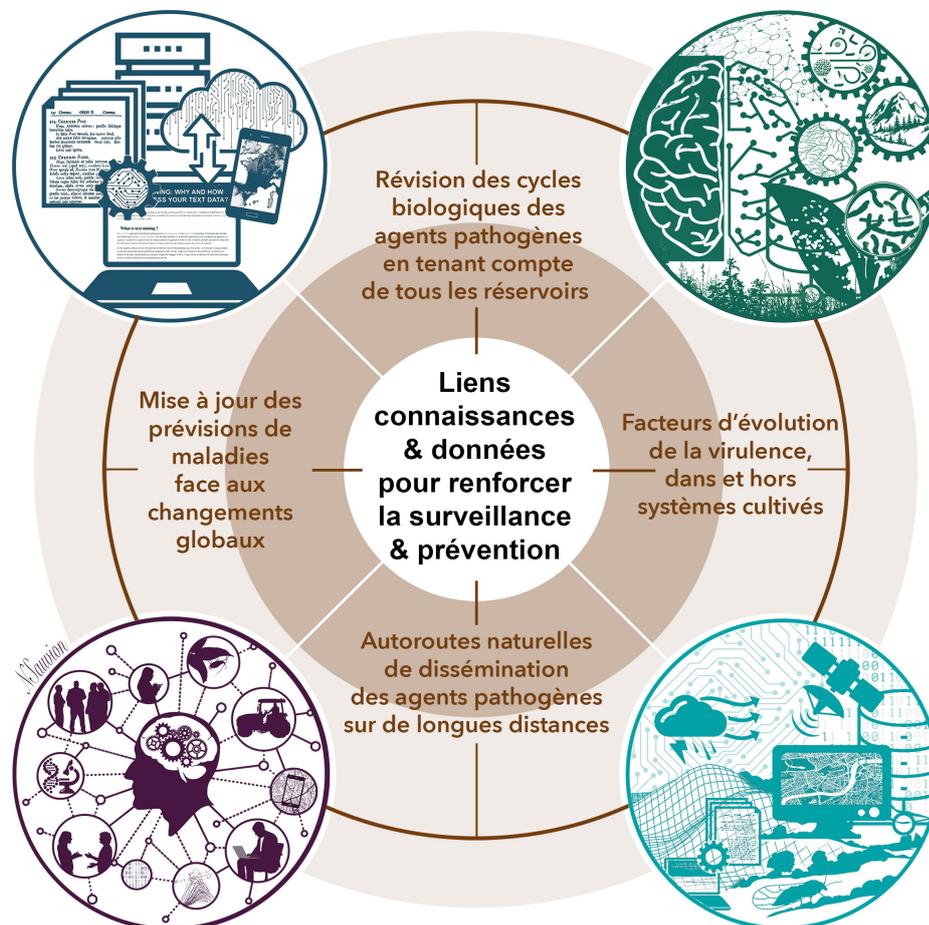
AlvisNLP est un outil de traitement automatique du langage naturel (NLP), c'est-à-dire utilisant des algorithmes et des modèles d'intelligence artificielle pour analyser des textes ou des discours de manière similaire à la compréhension humaine. Cet outil permet d'analyser de grands volumes de données textuelles.



▲ Découvrir le Système d'Information BEYOND et son catalogue de données.

## ► Avancées

### Indicateurs et outils adaptés aux différentes stratégies



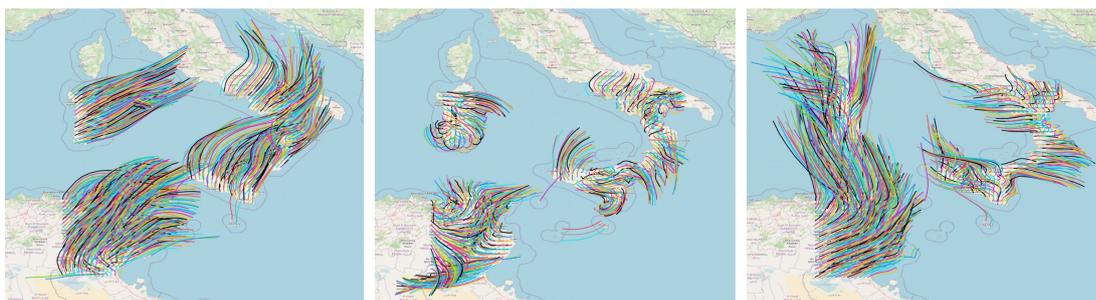
#### ▲ Représentation des approches combinées pour le développement d'indicateurs<sup>1</sup>.

© Nicolas Sauvion.

Par son approche multi-stratégique et synchronisée, et au travers de ses différents pathosystèmes d'étude, **BEYOND** développe différents indicateurs et outils :

- Des **connaissances** sur les **réservoirs d'agents pathogènes**, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'agriculture, et sur les méthodes de leur détection (outils moléculaires et utilisation des chiens renifleurs).
- Des **approches** pour représenter et prédire les **trajectoires aériennes** des éléments de dissémination des pathogènes et de leurs éventuels vecteurs (propagules, spores, insectes, ...). **BEYOND** vise ainsi à améliorer le positionnement des échantillonneurs d'air (utilisés en surveillance environnementale et sanitaire) et à renforcer les indicateurs de risque, en intégrant les conditions météorologiques et les connectivités géographiques qu'elles génèrent.

<sup>1</sup> D'après Morris et al., 2022, « One Health Concepts and Challenges for Surveillance, Forecasting, and Mitigation of Plant Disease beyond the Traditional Scope of Crop Production ».



▲ **Exemples de trajectoires de masses d'air au sein du bassin méditerranéen à trois dates différentes.**

© Samuel Soubeyrand.

Ces masses d'air sont générées par HYSPLIT, un modèle informatique utilisé pour simuler la trajectoire des particules atmosphériques, via l'application web Tropolink. Elles donnent des indications sur le transport potentiel par le vent de divers pathogènes et insectes ravageurs, de ou de vecteurs d'intérêt pour la santé végétale et animale<sup>2</sup>.

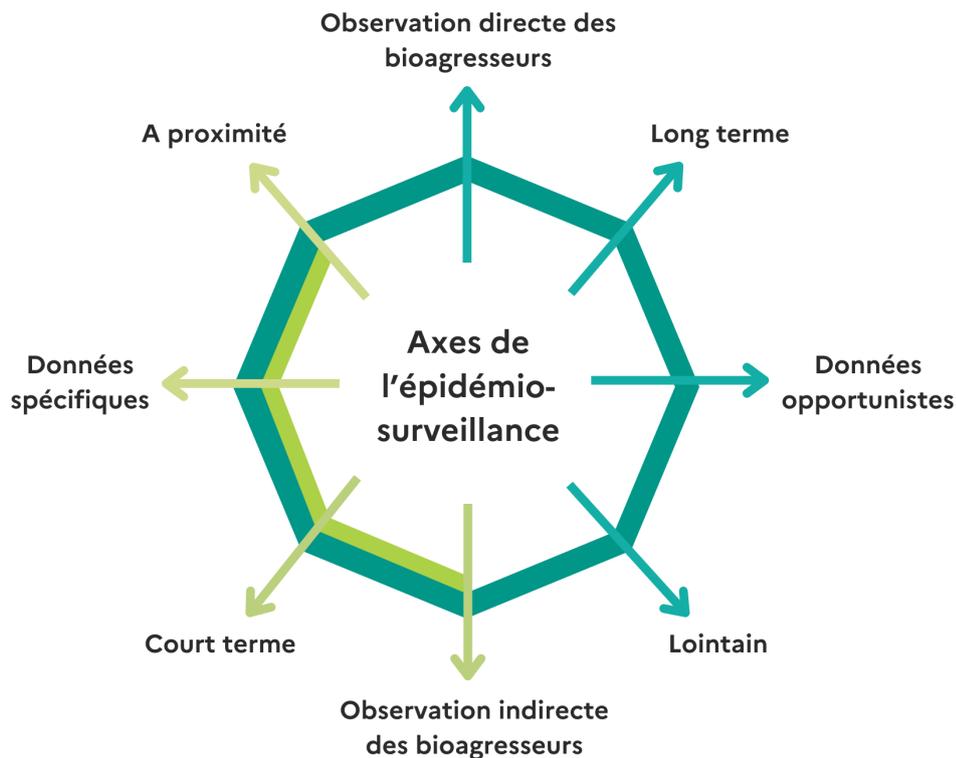
Ces trajectoires permettent de connecter des zones géographiques distantes à plus ou moins grande fréquence. L'application Tropolink permet, à partir de ces ensembles de trajectoires, d'estimer des mesures de connectivité qui peuvent ensuite être mobilisées pour mesurer des risques d'émergence et de propagation.

- Des **cartes de risques** développées à partir d'un large éventail d'indicateurs environnementaux. Ces cartes pourront être couplées à d'autres **indicateurs de la variabilité génétique de l'agent pathogène et aux tendances comportementales des agriculteurs** en matière de pratiques agronomiques.
- Des **cartographies** des réseaux de **circulation du matériel végétal** au travers des **flux commerciaux**.
- De **nouveaux indicateurs** pour mieux surveiller des réservoirs, pour anticiper l'arrivée sur de longues distances de pathogènes et d'insectes porteurs de pathogènes via l'atmosphère, et qui intègrent **contextes géographiques et pédoclimatiques**. Cette dernière approche est explorée pour les maladies disséminées par le vent et/ou les insectes.



2 Richard et al., 2023, « Computing Geographical Networks Generated by Air-Mass Movement ».

## Concept développé et porté par le projet BEYOND



▲ Le concept des 8 axes d'indicateurs porté par le projet BEYOND pour donner une nouvelle grille de lecture et ouvrir l'épidémiologie de surveillance dans l'espace et dans le temps.

© Cindy Morris, Samuel Soubeyrand.

## ► Perspectives

Les approches innovantes mises en place par le projet **BEYOND** combinent l'analyse des données et la modélisation prédictive, contribuant ainsi à une stratégie nouvelle pour comprendre et relever les défis épidémiques grâce à une surveillance continue.

En tirant parti de ces informations et en utilisant des techniques de visualisation efficaces, le projet cherche à faciliter non seulement la compréhension, mais aussi à enrichir les graphes de connaissances, ce qui permet de prendre des mesures proactives pour anticiper les risques d'épidémies et relever le défi « One Health » (Une seule santé).

Les indicateurs développés pour anticiper l'arrivée sur de longues distances de pathogènes et d'insectes porteurs de pathogènes via l'atmosphère, visent à favoriser une surveillance très en amont pour donner le temps de protéger de façon préventive les cultures par la lutte biologique ou l'utilisation de barrières physiques, par exemple (voir d'autres projets du PPR Cultiver et Protéger Autrement, comme **CAP ZERO PHYTO** ou **VITAE**).

## ► Références

- Sandro Bimonte, Enrico Gallinucci, Patrick Marcel, et Stefano Rizzi. « Logical Design of Multi-Model Data Warehouses ». *Knowledge and Information Systems* 65, no 3 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10115-022-01788-0>.
- Sandro Bimonte, Patrick Marcel, et Stefano Rizzi. « Be High on Emotion: Coping with Emotions and Emotional Intelligence When Querying Data ». In *New Trends in Database and Information Systems*, édité par Alberto Abelló, Panos Vassiliadis, Oscar Romero, Robert Wrembel, Francesca Bugiotti, Johann Gamper, Genoveva Vargas Solar, et Ester Zumpano, 82-91. Cham: Springer Nature Switzerland (2023). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42941-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42941-5_8).
- Sandra Dérozier, Robert Bossy, Louise Deléger, Mouhamadou Ba, Estelle Chaix, Olivier Harlé, Valentin Loux, Hélène Falentin, et Claire Nédellec. « Omnicrope, an Open-Access Database of Microbial Habitats and Phenotypes Using a Comprehensive Text Mining and Data Fusion Approach ». *PLOS ONE* 18, no 1 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272473>.
- Cindy E Morris, Ghislain Géniaux, Claire Nédellec, Nicolas Sauvion, et Samuel Soubeyrand. « One Health Concepts and Challenges for Surveillance, Forecasting, and Mitigation of Plant Disease beyond the Traditional Scope of Crop Production ». *Plant Pathology* 71, no 1 (2022). <https://doi.org/10.1111/ppa.13446>.
- Andrea Radici, Davide Martinetti, et Daniele Bevacqua. « Early-Detection Surveillance for Stem Rust of Wheat: Insights from a Global Epidemic Network Based on Airborne Connectivity and Host Phenology ». *Environmental Research Letters* 17, no 6 (2022). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac73aa>.
- Andrea Radici, Davide Martinetti, et Daniele Bevacqua. « Global Benefits and Domestic Costs of a Cooperative Surveillance Strategy to Control Transboundary Crop Pathogens ». *PLANTS, PEOPLE, PLANET* 5, no 6 (2023). <https://doi.org/10.1002/ppp3.10379>.
- Richard, H., D. Martinetti, D. Lercier, Y. Fouillat, B. Hadi, M. Elkahky, J. Ding, J., Michel, L., Morris, C.E., Berthier, K., Maupas, F., Soubeyrand. « Computing Geographical Networks Generated by Air-Mass Movement ». *GeoHealth* 7, no 10 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GH000885>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Cindy Morris ([cindy.morris@inrae.fr](mailto:cindy.morris@inrae.fr)), Samuel Soubeyrand ([samuel.soubeyrand@inrae.fr](mailto:samuel.soubeyrand@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/beyond>



# CAP ZERO PHYTO - RENFORCER L'IMMUNITÉ DES CULTURES FRUITIÈRES ET MARAÎCHÈRES PAR DES COMBINAISONS DE LEVIERS

## ► Contexte

Avec l'interdiction de certains pesticides, les filières horticoles (horticulture maraîchère et arboriculture fruitière) sont confrontées à un défi majeur : gérer efficacement les bioagresseurs tout en produisant des fruits et légumes de qualité qui répondent aux attentes du marché.

Pour réussir la transition agroécologique à différentes échelles (parcelle - exploitation - paysage - territoire), renforcer l'immunité des cultures vis-à-vis des bioagresseurs est une contribution essentielle.

C'est l'objectif du projet **CAP ZERO PHYTO** qui vise à optimiser la résistance partielle multi-bioagresseurs du pommier et de la tomate en combinant résistance génétique, application de stimulateurs de défenses des plantes (SDP) ou d'UV-C et gestion de l'azote (diète N), et en intégrant des plantes fournissant divers services vis-à-vis des ravageurs (répulsion, piégeage) et auxiliaires (attraction, abri, nourriture) dans et autour des parcelles.



### ▲ Leviers d'actions étudiés dans le projet CAP ZERO PHYTO.

© Myriam Tisserand, crédits photo : Tomates, Myriam Tisserand ; Pommier, Getty images.

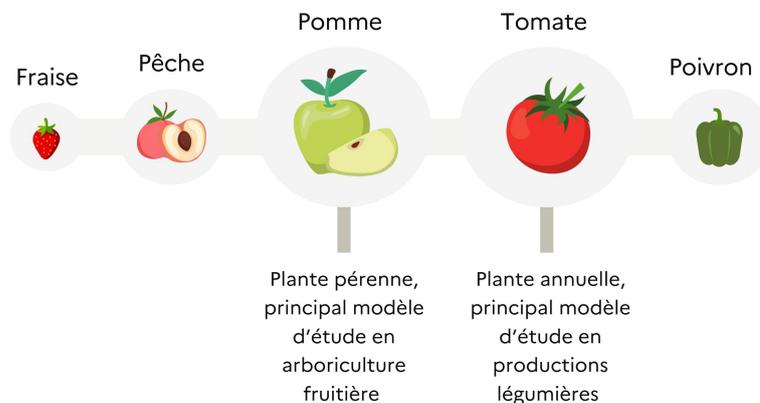
Au total, 5 leviers dans la lutte contre les bioagresseurs sont étudiés de façon individuelle et combinée, pour les deux modèles d'étude et leurs bioagresseurs respectifs.

## ► Stratégies déployées

**CAP ZERO PHYTO** travaille autour de deux modèles d'étude emblématiques de l'horticulture : le pommier et la tomate. Le projet élargit également ses recherches à d'autres cultures présentes sur le territoire : d'autres Rosacées comme le pêcher et le fraisier, ainsi que d'autres Solanacées comme le poivron.

Les bioagresseurs ciblés sont :

- pour le pommier : *Venturia inaequalis* (tavelure), *Erwinia amylovora* (feu bactérien) et *Dysaphis plantaginea* (puceron cendré),
- pour la tomate : *Phytophthora infestans* (mildiou), *Oidium neolicopersici* (oidium), *Botrytis cinerea* (pourriture grise), *Tuta absoluta* (mineuse), *Bemisia tabaci* (aleurode) et *Meloidogyne incognita* (nématode à galle).

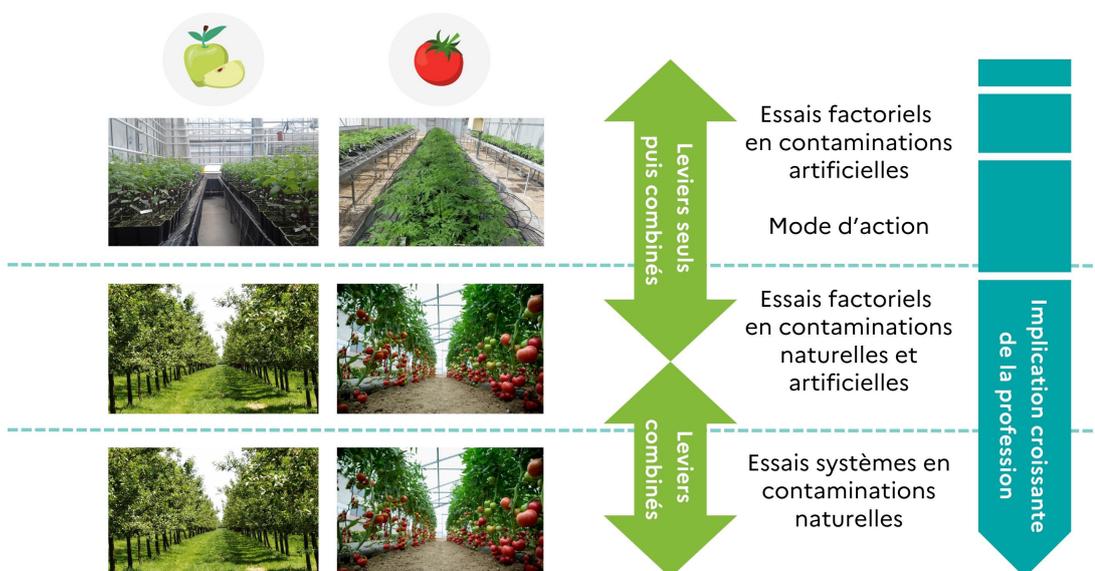


### ▲ Modèles d'étude du projet CAP ZERO PHYTO.

© Marie-Noëlle Brisset, Hélène Gautier, Myriam Tisserand.

Le projet **CAP ZERO PHYTO** s'est construit autour d'un consortium de 11 partenaires de recherche regroupant pathologistes et entomologistes spécialistes des bioagresseurs visés, généticiens, écophysiologistes et expérimentateurs-terrain des espèces concernées, et économistes agricoles.

La stratégie globale est d'étudier l'efficacité et le mode d'action des leviers, individuels et progressivement combinés, en conditions contrôlées, afin de repérer des additivités ou des complémentarités de mécanismes, puis de faire des preuves de concept sur plantes en conditions de production au travers d'essais factoriels et d'essais systèmes.



### ▲ Stratégie globale du projet CAP ZERO PHYTO.

© Marie-Noëlle Brisset, Myriam Tisserand, crédits photo : Tomates en serre, Jean-François Bourgeay ; Pommiers en serre, Marie-Noëlle Brisset ; Tomates en tunnel de production et verger, Getty images.

Pour réussir le changement d'échelle, des échanges entre acteurs de la recherche et professionnels (instituts techniques, stations régionales, conseillers et producteurs) sont mis en place tout au long du projet, au travers d'ateliers et d'enquêtes. L'objectif de ces échanges est de co-concevoir des essais systèmes et d'analyser la faisabilité (technique, organisationnelle et économique) et l'acceptabilité des différents leviers.

## ► Avancées

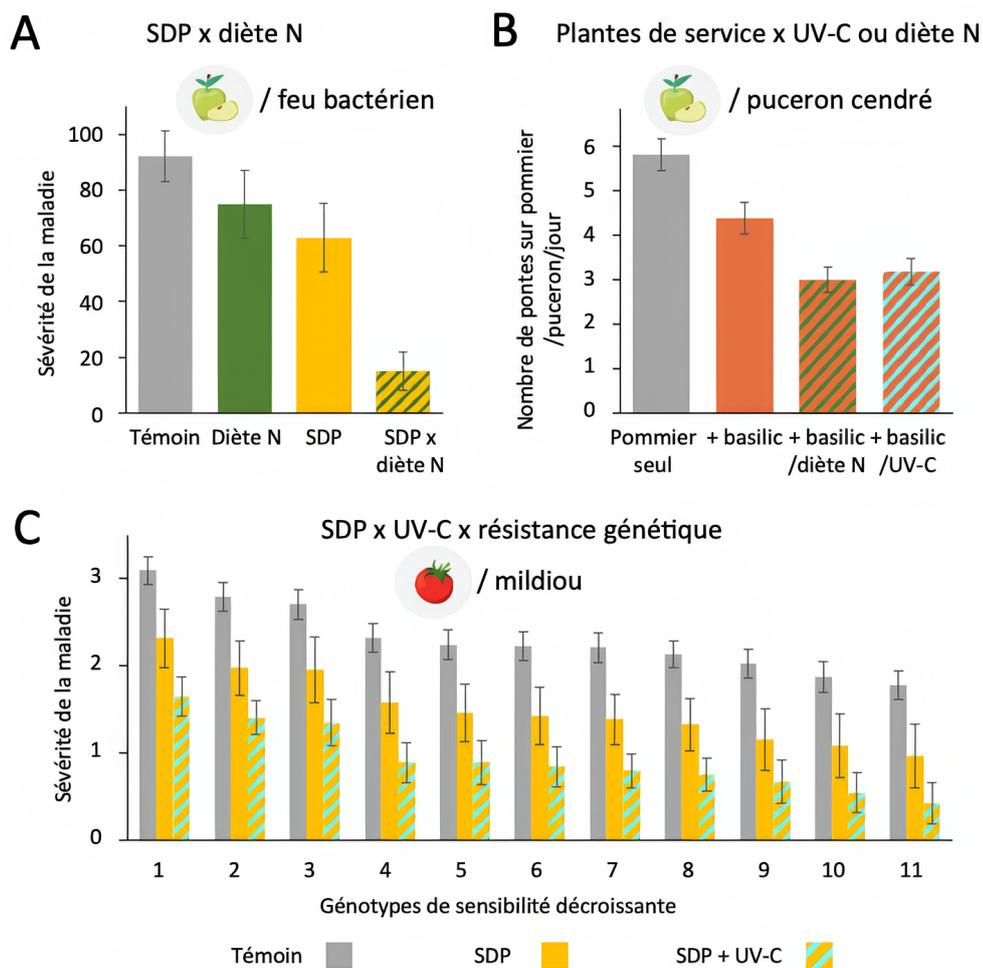
### Etudier et combiner les leviers

#### *Quelques exemples de combinaisons de leviers efficaces en conditions contrôlées*

L'étude de l'efficacité des leviers vis-à-vis des différents bioagresseurs ciblés a déjà révélé des combinaisons très intéressantes en termes de niveau de protection obtenu, avec des additivités, voire des synergies entre leviers. Les modes opératoires sont variés et les combinaisons à étudier multiples mais globalement, les expériences consistent à :

- préconditionner ou non des plantes de pommiers ou de tomates, ayant des résistances génétiques plus ou moins marquées, par des applications de SDP ou d'UV-C et/ou des diètes azotées transitoires, et/ou à mettre ces plantes en présence de plantes de service (elles-mêmes pouvant être conditionnées par les mêmes traitements),
- les contaminer artificiellement par les bioagresseurs pour suivre l'évolution des symptômes de maladies ou le développement de ravageurs.





**▲ Exemples d'efficacité de leviers, seuls ou combinés, vis-à-vis de différents bioagresseurs du pommier ou de la tomate en conditions contrôlées.**

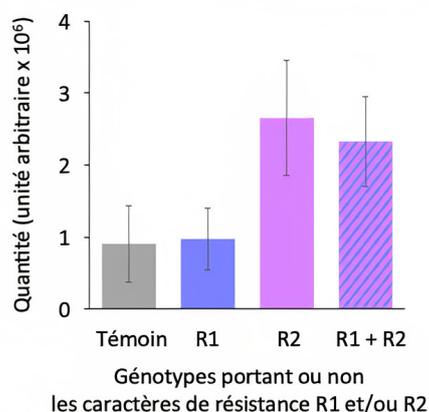
© Marie-Noëlle Brisset, Hélène Gautier, Bernard Caromel, Myriam Tisserand, d'après les thèses de : A- Térance Mobarak, B- Louna Rizzi et C- Awa Sangaré.

Sévérité de maladies ou développement des populations de pucerons évalués dans les jours ou semaines suivant une contamination artificielle. A- et C- Evaluations effectuées sur plantes entières ayant subi, préalablement à l'inoculation, des traitements SDP ou UV-C ou des diètes azotées. B- Les leviers diète azotée ou UV-C ont été appliqués sur la plante de service (basilic) en culture, puis les pucerons ont été placés sur des feuilles détachées de pommier, en présence de feuilles détachées de basilic, en boîte de Petri.

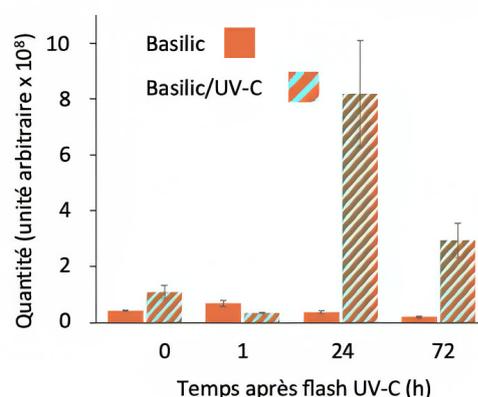
**Recherche des mécanismes**

L'analyse approfondie des mécanismes moléculaires à l'origine des effets de protection apportés par les différents leviers permet de comprendre les similarités ou au contraire les complémentarités des modes d'action. Cette recherche se situe à différents niveaux de réponses (ADN, ARN, protéines, métabolites) dans différents organes (feuilles, racines) des plantes hôtes et des plantes de service. Elle vise à identifier dans un premier temps des biomarqueurs corrélés aux effets de protection des leviers, que ce soit par leur présence (ADN) ou leur forte accumulation (ARN, protéines, métabolites).

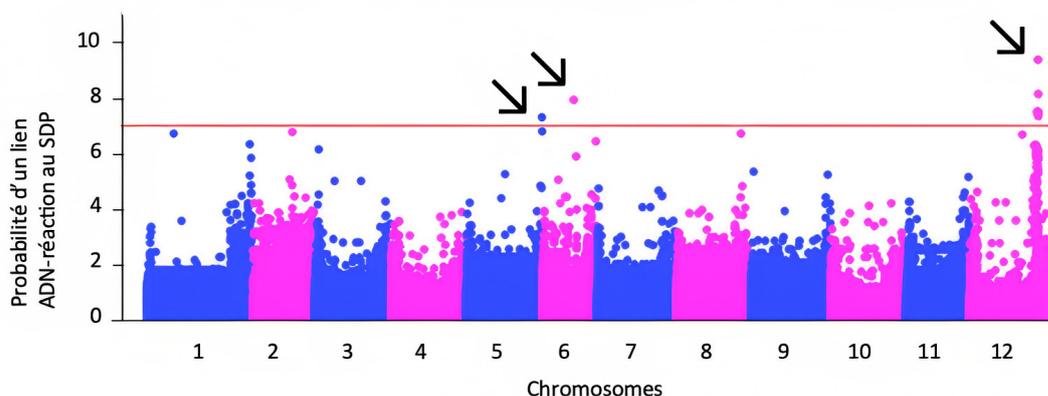
**A** Accumulation d'un terpénoïde dans des pommiers après infection par *V. inaequalis*



**B** Production accrue d'un composé volatil par du basilic flashé aux UV-C



**C** Présence de séquences d'ADN particulières (↘) sur les chromosomes de génotypes de tomate réactifs à des SDP



▲ Exemples d'identification de biomarqueurs corrélés à l'efficacité de certains leviers chez le pommier, la tomate et une plante de service.

© Marie-Noëlle Brisset, Hélène Gautier, Bernard Caromel, Myriam Tisserand, d'après les thèses de A- Romane Lapous, B- Louna Rizzi et C- Awa Sangaré.

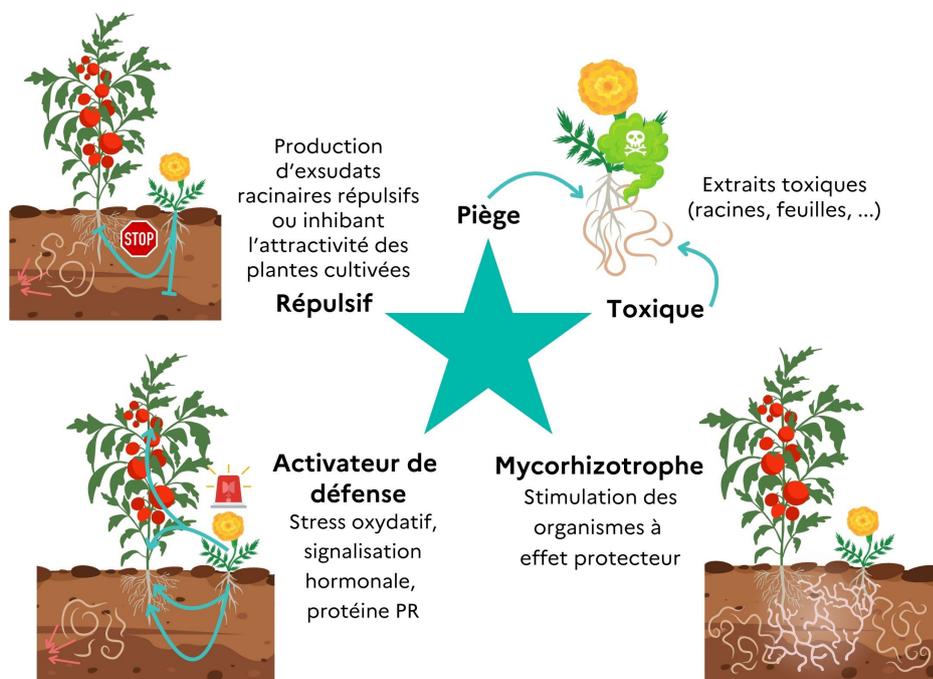
A- Analyse UHPLC-MS\* de feuilles de pommiers portant ou non deux caractères de résistance R1 et R2 à la tavelure, 5 jours après infection. B- Analyse TD-GC-MS\*\* de composés volatils émis par du basilic flashé ou non par des UV-C. C- Cartographie, à partir d'une collection de 127 accessions de tomate, des régions chromosomiques impliquées dans la variation du niveau de protection conféré par un SDP vis-à-vis de l'oidium.

\* L'analyse UHPLC-MS est une technique analytique avancée utilisée pour séparer, identifier et quantifier des composés dans des échantillons complexes.

\*\* L'analyse TD-GC-MS est une méthode utilisée pour détecter et identifier des composés volatils.

La suite de ces recherches consiste à démontrer l'action biologique de ces biomarqueurs, en termes de toxicité ou de répulsion vis-à-vis des bioagresseurs ou d'implication dans des phénomènes de signalisation cellulaire conduisant au renforcement de l'immunité. Des études sont également entreprises pour comprendre les variations de l'efficacité des leviers (et de l'expression des biomarqueurs) en fonction des conditions environnementales.

L'ensemble de ces connaissances permet de mieux connaître l'efficacité de chacun des leviers dans des environnements variés, ainsi que leurs effets parfois multiples, et de raisonner leurs combinaisons en visant à la fois une amplification et une diversification des mécanismes de défense mis en jeu dans la plante hôte comme dans la plante de service, pour optimiser la lutte contre les maladies et ravageurs des cultures et augmenter la durabilité des stratégies proposées.



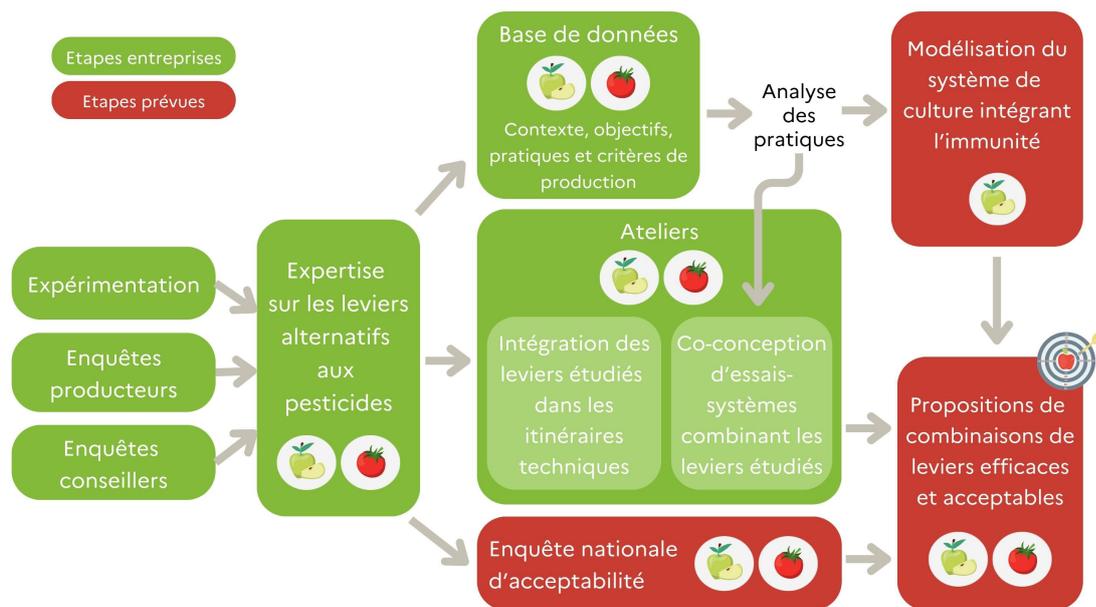
▲ Exemple de la tagète, plante de service aux modes d'action multiples vis-à-vis des nématodes à galle de la tomate.

© Caroline Caporalino, Myriam Tisserand, d'après la thèse de Cliven Njekete.

## Réussir le changement d'échelle

Certaines stratégies de combinaisons de leviers sont actuellement testées en verger de pommiers et sur tomates en tunnel chez les partenaires, pour valider leur efficacité en situation de production.

Les interactions avec les acteurs professionnels sont engagées sur plusieurs plans. Des enquêtes ont été réalisées auprès de producteurs et de conseillers sur le niveau d'utilisation actuelle des leviers du projet et plus largement de tout type de leviers agroécologiques, et sur le ressenti sur leur efficacité. Les résultats de ces enquêtes, combinés aux connaissances des acteurs de la recherche, ont été formalisés dans une base de données.



▲ **Etapes suivies par le projet CAP ZERO PHYTO pour faciliter la mise en place et le transfert des combinaisons de leviers étudiés.**

© Laure Perchepied, Julie Borg, Myriam Tisserand.

La base de données et l'expertise des acteurs ont alimenté plusieurs ateliers autour des plantes de service et du co-design de vergers « Zéro phyto » à Avignon (verger factoriel, plantation février 2023) et à Angers (verger système, plantation prévue hiver 2025) et d'essais système sur tomate (premiers essais 2024).



▲ **Méthodologie de l'atelier de co-design d'un verger « Zéro phyto » (Angers, décembre 2022) illustrée sous forme de bande dessinée.**

© Laure Perchepied, Catherine Bernard, Loïse Triollet.

## Perspectives

L'ensemble des actions de **CAP ZERO PHYTO**, menées en conditions contrôlées ou sur le terrain, illustre la nécessité d'adopter une approche intégrative au niveau de la parcelle de production, prenant en compte les leviers et leurs interactions, leur mode d'action, l'environnement pédoclimatique et la conduite de la culture. Le projet a initié une démarche de modélisation pour mieux prédire les effets des combinaisons de leviers sur l'immunité des plantes à partir des connaissances progressivement acquises. Ces travaux devraient orienter les essais en vergers de pommiers et en tunnels de tomates, qui vont s'intensifier jusqu'à la fin du projet. Les essais seront élargis au poivron, au pêcher et au fraisier, afin d'évaluer la généralité des nouvelles pratiques. L'analyse de l'acceptabilité économique des nouvelles conduites de culture proposées sera réalisée via un travail d'enquêtes auprès des agriculteurs à l'échelle nationale.

## Références

- Komla Exonam Amegan, Yasmine Fourati, Sylvia Del-valle, Sylvia Salgon, Paola Ferrante, Christophe Robin, Anne-Violette Lavoir, Bernard Caromel, Romain Lariat, et Alan Kergunteuil. « Joint Effects of Inter-Specific and Intra-Specific Diversity of Tomato Volatile Profiles on Antixenosis against *Tuta Absoluta* ». *Entomologia Generalis* (2024). <https://doi.org/10.1127/entomologia/2024/2399>.
- Juliette Bénéjam, Julie Ferreira de Carvalho, Elisa Ravon, Christelle Heintz, Matthieu Gaucher, Charles-Eric Durel, Marie-Noëlle Brisset, et Laure Perchepped. « Phenotyping data coupled with RNA sequencing of apple genotypes exhibiting contrasted quantitative trait loci architecture for apple scab (*Venturia inaequalis*) resistance ». *Data in Brief* 56 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110778>.
- Térance Mobarak, Mickaël Delaire, Marie-Noëlle Brisset, et Mathilde Orsel. « Transcriptomic dataset of *Malus domestica* young leaves in response to acibenzolar-S-methyl (ASM) and/or nitrogen nutrition ». *Data in Brief* 55 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110727>.
- Thomas Presseccq, Philippe C. Nicot, Jean François Bourgeay, Aurélie Rousselin, Claire Goillon, Marc Bardin, et Marc Tchamitchian. « Using microbial biocontrol for disease control in French vegetable production: An analysis of the perspectives of farmers and farm advisors ». *Crop Protection* 180 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106648>.
- Caroline Djian-Caporalino, Audrey Alignier, Marie Chave, Anne-Marie Cortesero, Nicolas Desneux, Antoine Gardarin, Claire Goillon, Severin Hatt, Coline Jaworski, Anne-Violette Lavoir, Cliven Njekete, Célia Seassau Des plantes multiservices ou combinées pour un multiservice. In : *Plantes de services : Vers de nouveaux agroécosystèmes* (2024). Editions QUAE, Collection Synthèses. Parution prévue le 28 novembre 2024.
- Louna Rizzi, Muhamad Rafiq, Mélanie Cabrol, Sylvaine Simon, Laurent Gomez, Claire Lavigne, Pierre Franck, Hélène Gautier. Effect of intercropping apple trees with basil (*Ocimum basilicum*) or French marigold (*Tagetes patula*) on the rosy apple aphid regulation (*Dysaphis plantaginea*) and the abundance of its natural enemies (2024). *Pest Management Science* (en révision).
- Benjamin Yguel, Ainara Peñalver-Cruz, Christelle Heintz, Ferreol Braud, Christian Cattaneo, Matthieu Gaucher, Ismael Moindziwa, Margot Bricout, Marie-Noëlle Brisset, Arnaud Lemarquand, Frédérique Didelot, Bruno Jaloux. Exclusion of ants conditions the efficiency of an attract and reward strategy against *Dysaphis plantaginea* in apple orchards (2024). *Journal of Pest Science* (en révision).

## Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Hélène Gautier ([helene.gautier@inrae.fr](mailto:helene.gautier@inrae.fr)), Marie-Noëlle Brisset ([marie-noelle.brisset@inrae.fr](mailto:marie-noelle.brisset@inrae.fr)), Bernard Caromel ([bernard.caromel@inrae.fr](mailto:bernard.caromel@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/cap-zero-phyto>

# DEEP IMPACT - ANALYSER LES INTERACTIONS PLANTE- MICROBIOTE POUR PROMOUVOIR LA DÉFENSE DES PLANTES AUX BIOAGRESSEURS

## ► Contexte

Le microbiome associé aux plantes apparaît comme un levier clé en agroécologie et une source d'innovation majeure pour réduire les pesticides de synthèse (1) en mobilisant des approches agronomiques pilotant le microbiome des sols et offrant des solutions de biocontrôle par conservation, (2) par inoculation de consortia microbiens fonctionnels affectant la performance des bioagresseurs et/ou modulant l'immunité de la plante, (3) ou encore par des méthodes de sélection de nouvelles variétés pour un holobionte-plante fonctionnel et multiperformant.

Cependant, il est nécessaire de consolider un socle de connaissances et d'accélérer la recherche pour concevoir et intégrer ces nouvelles solutions agroécologiques

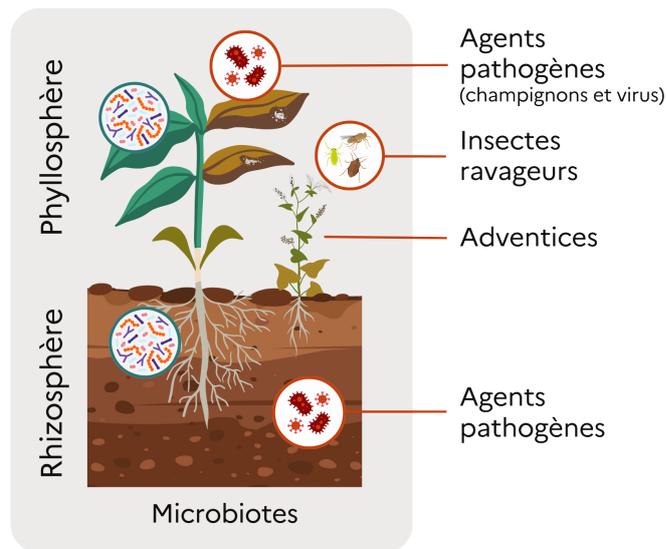
Le projet **DEEP IMPACT** vise à combiner l'écologie, l'agronomie, la microbiologie et la génétique des plantes aux mathématiques, afin de mieux comprendre les interactions entre communautés microbiennes, communautés végétales et facteurs abiotiques (pratiques agricoles) modulant la résistance du blé et du colza aux bioagresseurs.

## ► Stratégies déployées

**Zoom sur le microbiote :** Le microbiote correspond à l'ensemble des micro-organismes (bactéries, champignons, oomycètes, ...) vivant en interaction dans un environnement biotique et abiotique spécifique qui définit le microbiome. Le microbiote rassemble donc une diversité d'espèces qui s'organise dans une niche écologique. Ainsi, la surface aérienne ou racinaire des plantes, mais également les tissus végétaux, abritent de multiples communautés qui interagissent entre elles et avec les composantes de l'environnement physico-chimique et biologique (comme les bioagresseurs).

La notion de microbiome élargit encore un peu ce prisme en ajoutant à la diversité des espèces, d'une part la diversité des fonctions et des métabolites microbiens potentiels ou exprimés, et d'autre part les interactions entre organismes et avec les composantes du milieu dans lequel évoluent ces microbiotes.

Cette notion d'interaction permet d'aller encore plus loin en intégrant le concept d'holobionte, qui définit une nouvelle entité biologique et évolutive constituée de l'hôte, ici la plante, et de son microbiote associé. L'étude de l'holobionte-plante est au cœur du projet **DEEP IMPACT**.



### Holobionte plante

#### ▲ Représentation schématique de l'holobionte de la plante.

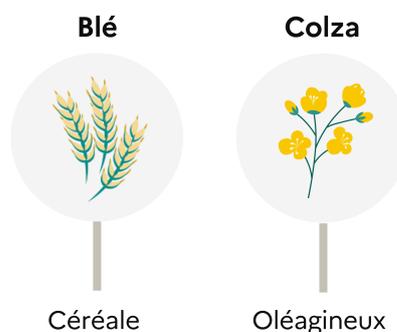
© Christophe Mougel, Myriam Tisserand.

La diversité microbienne associée à la plante montre de nombreux effets sur la performance de l'hôte en jouant sur sa santé ou sa nutrition. De nombreux travaux montrent que la diversité inexploitée du microbiote du sol et du microbiote associé aux plantes a une influence sur la résistance des plantes à différents bioagresseurs, et ainsi contribue à l'adaptation de la plante à ces contraintes :

- soit en modulant l'immunité de la plante ;
- soit par des interactions microbiote-bioagresseurs via des mécanismes de compétition, d'antagonisme, ou de parasitisme.

L'hypothèse centrale du projet **DEEP IMPACT** suppose que les pratiques agronomiques et les caractéristiques pédoclimatiques de l'environnement influencent et modulent le microbiote du sol, réservoir à partir duquel la plante va établir et expérimenter des interactions avec un microbiote fonctionnel. Parvenir à mobiliser le microbiote associé aux plantes nécessite donc une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents aux interactions plante-microbiote dans des contextes agroécologiques réalistes.

Le projet **DEEP IMPACT** cible les interactions des microbiotes associés aux cultures de blé ou de colza et leurs cortèges de bioagresseurs respectifs. Le projet travaille dans plusieurs régions agricoles offrant des situations contrastées de contextes pédoclimatiques et de pratiques agronomiques.

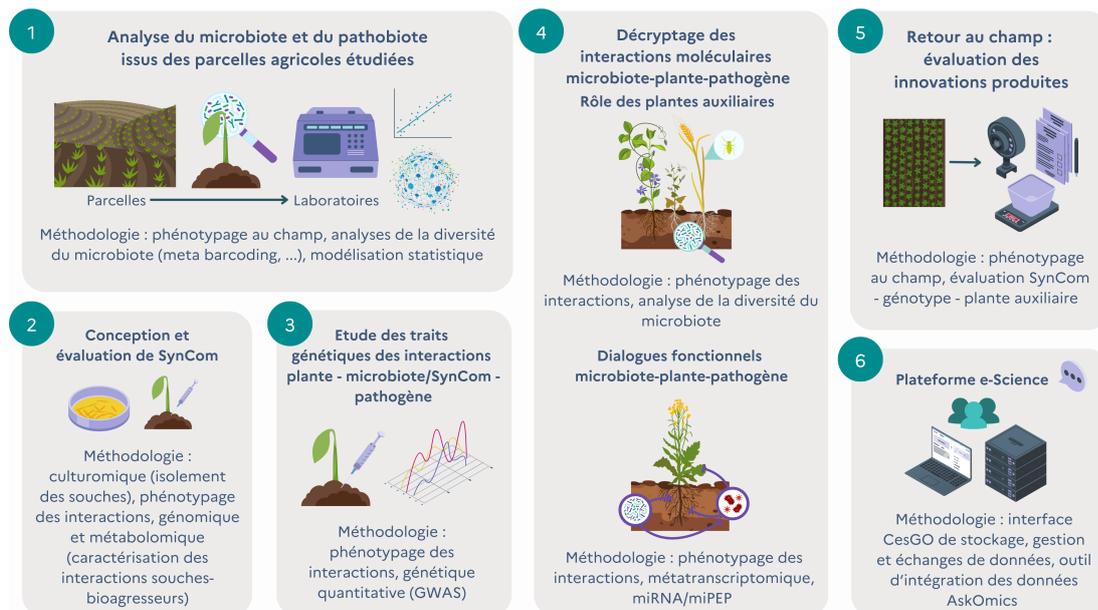


#### ▲ Plantes modèles étudiées dans le projet DEEP IMPACT.

© Christophe Mougel, Myriam Tisserand.

Sa stratégie repose sur une méthodologie en plusieurs étapes pour :

- Acquérir des connaissances fondamentales, développer une interface d'apprentissage de la recherche pour promouvoir les concepts du microbiote.
- Évaluer et optimiser les pratiques agricoles pour favoriser un microbiote fonctionnel bénéfique, localement adapté.
- Développer des solutions innovantes basées sur la culture de micro-organismes et les communautés synthétiques (« SynCom ») pour renforcer la résistance des plantes et participer au développement du biocontrôle.
- Identifier les traits génétiques des plantes qui favorisent un microbiote sain et les intégrer dans de nouveaux critères de sélection.



### ▲ Méthodologie et étapes suivies par le projet DEEP IMPACT.

© Christophe Mougel, Myriam Tisserand.

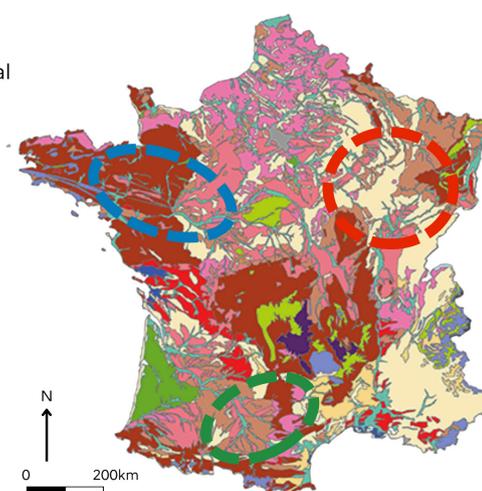
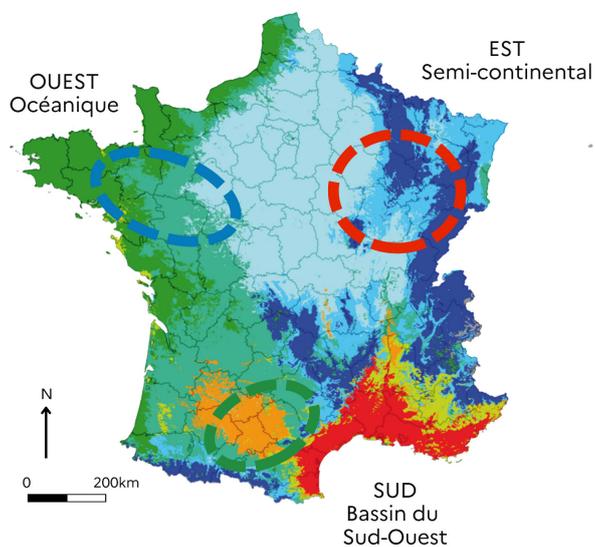
## ► Avancées

**1** 200 parcelles agricoles (100 pour chaque espèce cultivée) provenant d'un réseau de parcelles d'agriculteurs volontaires sont mobilisées dans 3 régions (Bourgogne, Bretagne et Occitanie) en caractérisant les variables relatives à chaque environnement et en ciblant des pratiques connues pour moduler la diversité du microbiote dans les sols (travail du sol, gestion des bioagresseurs, gestion de la matière organique, diversification des cultures). Dans ces parcelles, une zone expérimentale dans laquelle aucun traitement phytosanitaire n'est appliqué a été caractérisée sur la base des paramètres abiotiques et biotiques. Les informations tirées de cette caractérisation sont intégrées dans des modèles statistiques corrélatifs qui permettront de décrire la part relative de la variance expliquée par les différents paramètres collectés comme les pressions biotiques, la performance des cultures, les caractéristiques de l'habitat, les pratiques agricoles et la diversité des microbiotes. Ces analyses permettront d'identifier les composantes de la diversité microbienne associées à une réduction des attaques de bioagresseurs et *in fine* à une meilleure performance des cultures.

### 3 zones géographiques avec :

3 grands types de climat

Une diversité de sols



⊕ Une diversité de pratiques agronomiques

### ▲ Zones géographiques étudiées dans le projet DEEP IMPACT.

© Christophe Mougel, Myriam Tisserand.

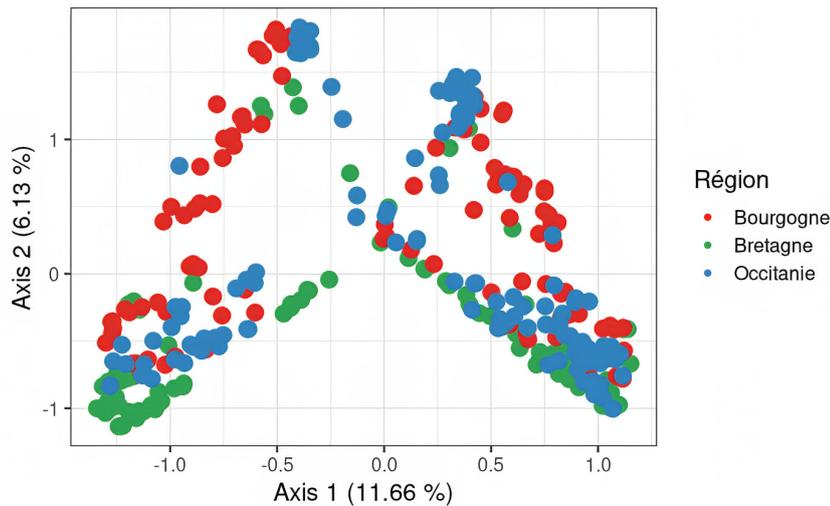
Sources : Les types de climats en France, une construction spatiale<sup>1</sup>, Daniel Joly, Thierry Brossard, Hervé Cardot, Jean Cavailhes, Mohamed Hilal et Pierre Wavresky (à gauche) et Base de Données Géographique des Sols de France<sup>2</sup>, INRAE (à droite).

L'ensemble de données de terrain et métadonnées ont été collectées sur deux campagnes et archivées dans le système d'information du projet. Les premières analyses des variables ont montré des différences significatives entre régions sur la base de la pression des bioagresseurs (maladies fongiques, virales et dégâts des ravageurs), des flores adventices et de la performance des cultures, tout comme des gradients pédoclimatiques. Cela a permis de valider une stratégie d'échantillonnage pour ces trois régions pédoclimatiques. Les données de diversité des microbiotes montrent des effets significatifs en termes de régions, saisons et parcelles. Les enquêtes des pratiques réalisées sont en cours d'étude et seront intégrées aux analyses statistiques à venir.



1 Joly et al., 2010, « Les types de climats en France, une construction spatiale ».

2 « Gis Sol », 1998 « Les Sols Dominants de France Métropolitaine ».



▲ **Illustration de la structure des communautés bactériennes des échantillons de sol des parcelles de colza.**

© D'après la thèse de Juliette Carpentier.

Avec deux dates de prélèvement sur l'assolement 2021-2022. Chaque point représente un échantillon. Plus les points sont proches entre eux, plus les communautés sont similaires en termes de diversité et d'abondance des « espèces » qui la composent. Les deux premiers axes de cette représentation expliquent 19,49% de la variance observée.

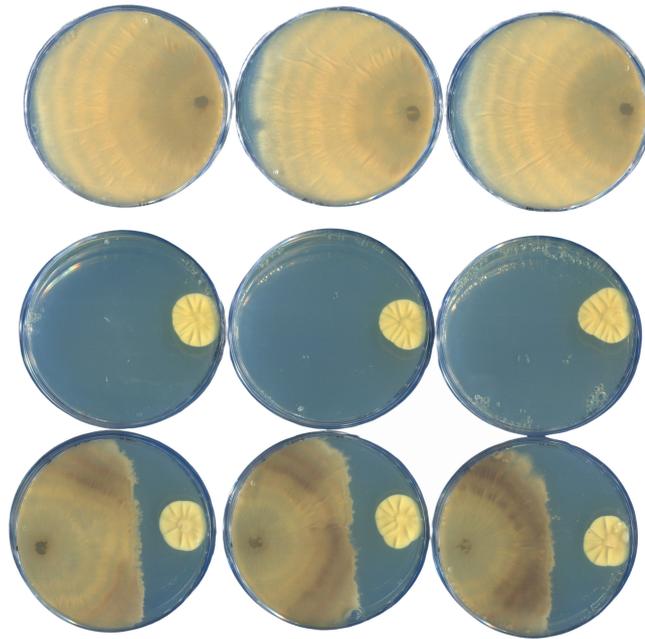
2 En parallèle et par des approches de culturomique, des bactéries et champignons sur les mêmes échantillons de terrain sont isolés, dans le but d'obtenir une collection microbienne du colza ou de blé représentative des contextes pédoclimatiques associés. Cette collection est caractérisée à la fois au niveau génomique, métabolomique (données expérimentales et prédites) et phénotypique (interaction microbes-pathogène et plante-microbes-pathogène).

Une collection d'isolats de champignons et de souches bactériennes est réalisée. Pour les champignons, cette collection a été définie sur la base de la taxonomie et de la diversité de la collection initiale, et caractérisée sur la base de leur profils métaboliques, de compétition ou antagonistes vis-à-vis de champignons pathogènes *in vitro*, et de modulation de la maladie *in planta*. Une modélisation du potentiel métabolique a été réalisée pour chaque isolat. Ces données permettront de construire une SynCom 'champignons' réduisant la maladie *in planta*. La collection de bactéries est en cours d'analyse en suivant une approche similaire.

Des consortia microbiens synthétiques (« SynComs ») peuvent ainsi être définis après intégration des données omiques (c'est-à-dire provenant des différentes approches : génomique, métabolomique, ...) et prédiction du phénotype par modélisation mathématique, pour tester leur efficacité sur un large éventail de ravageurs pour les deux cultures étudiées.

En microbiologie, la culturomique fait référence à l'utilisation de méthodes haut débit utilisant des techniques de culture en laboratoire. Ces approches permettent d'accéder à la diversité des microbiotes pour mieux l'étudier expérimentalement.

Un consortia synthétique ou « SynCom » correspond à un assemblage d'espèces microbiennes (bactéries, champignons) préalablement isolées. Sa construction est guidée par des hypothèses (souvent déduites de l'analyse des communautés *in situ*) et des connaissances des entités (potentiel génomique et métabolique, type d'interaction avec d'autres facteurs, ...).



▲ **Photographies comparatives illustrant les expériences de confrontation entre isolats de la collection de travail et agent pathogène pour caractériser la nature de l'interaction.**

© D'après la thèse de Juliette Carpentier.

Phénotypage des croissances des champignons seuls et en interaction avec : en haut, la souche pathogène *Rhizoctonia solani* ; au milieu, l'isolat candidat de la collection ; en bas, l'isolat candidat en confrontation avec la souche pathogène *Rhizoctonia solani*. L'analyse des données phénotypiques catégorise l'isolat de la collection comme antagoniste du champignon pathogène.

A l'analyse de la croissance individuelle de l'isolat de la collection ou de l'agent pathogène, la confrontation entre les deux permet de classer les isolats en 3 catégories : sans effet, antagonisme par antibiose (inhibition à la zone de confrontation) ou compétition pour la ressource (réduction des paramètres de croissance de l'agent pathogène)

3 Des « SynComs » ayant des effets bénéfiques, délétères ou neutres sur la résistance des plantes aux ravageurs, mais aussi des sols hébergeant des communautés microbiennes aux propriétés bénéfiques, pourront être mobilisés dans le cadre d'une étude de génétique quantitative sur un large panel de génotypes de blé et de colza, afin d'identifier des traits d'interaction entre plante et microbiote modulant la résistance de la plante face aux bioagresseurs.

4 Une approche fonctionnelle moléculaire est également développée pour analyser le dialogue moléculaire de l'ensemble des partenaires de l'interaction (microbiote-plantes-bioagresseurs) et pour tester l'impact de la diversité du microbiote sur la synthèse de miARN (molécules d'ARN non codant qui jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'expression des gènes), traduits en miPEP, des régulateurs qui participent au contrôle du développement et de la réponse au stress des plantes.

D'autre part, ce volet fonctionnel étudie également, par des approches d'écologie fonctionnelle, le rôle potentiel de plantes auxiliaires dans la modulation de la résistance des cultures aux ravageurs, en orientant et en pilotant un microbiome bénéfique pour la culture.

En parallèle, par des approches de bioinformatique, le projet analyse les données d'expression génétique issus des RNAseq (ou séquençage de l'ARN) pour identifier des miARN dans le dialogue moléculaire microbiote bactérien-colza-Plasmodiophora brassicea (champignon parasite). L'analyse différentielle d'expression permet ainsi de sélectionner des miARN candidats. Les miPEP correspondants sont en cours d'étude sur leur capacité à réduire la maladie.

Enfin, l'analyse de la diversité des flores au champ a permis de sélectionner un panel de 30 plantes adventices représentatives des diversités observées au champ. L'interaction de ces plantes compagnes du blé a été phénotypée sur la modulation de la performance du blé. Les diversités microbiennes associées à ces couples plante compagne-plante focale sont en cours d'analyse pour relier ces données aux données de performances. Les couples « élites » seront utilisés dans une expérimentation permettant d'évaluer l'effet de ces interactions sur la pression aux pucerons.

**Le RNAseq est une technique de biologie moléculaire utilisée pour analyser l'expression génétique à grande échelle.**

**5** Finalement, un retour à l'échelle du champ permettra de tester si les communautés microbiennes reconstruites associées à des plantes auxiliaires sont efficaces pour protéger les cultures contre les infections des bioagresseurs naturels dans un large éventail de zones pédoclimatiques françaises, et cela en remobilisant le réseau d'agriculteurs initial.

### Chiffres à retenir

<p><b>1</b> <b>200</b> Parcelles étudiées (100 de blé, 100 de colza)</p> <p><b>200</b> Enquêtes agricoles pour construire la typologie des pratiques</p> <p><b>3160</b> Relevés de biomasse (adventices et cultures)</p>	<p><b>24 000</b> Plantes phénotypées (16 000 au champ, 8000 au laboratoire)</p> <p><b>12 800</b> Microbiotes (bactéries et champignons)</p> <p><b>4800</b> Viromes</p>	<p><b>3</b> <b>500</b> Accessions de colza sélectionnées et multipliées (300 de blé et 200 de colza)</p>
<p><b>2</b> <b>9500</b> Caractérisations de taxons (1500 champignons et 8000 bactéries isolés)</p> <p><b>91</b> Isolats fongiques sélectionnés pour la collection de travail</p>	<p><b>279</b> Profils métaboliques</p> <p><b>27</b> Isolats d'intérêt identifiés (9 isolats fongiques antagonistes et 18 isolats fongiques compétiteurs pour les ressources)</p>	<p><b>4</b> <b>30</b> Plantes compagnes testées pour leur interaction sur la performance du blé</p> <p><b>933</b> 307 miARN identifiés chez le colza et 291 chez le pathogène ciblant 335 gènes chez les deux partenaires</p> <p><b>4</b> miPEP en cours d'analyse <i>in planta</i></p>
		<p><b>5</b> <b>En cours</b></p> <p><b>6</b> Centralisation des données dans l'outilCeSGO ; définition des ontologies et création des tableurs ; structuration et archivage des données collectées</p>

**▲ Chiffres à retenir.**

© Christophe Mougel, Myriam Tisserand.

## ► Perspectives

En positionnant le microbiote au cœur de ses recherches, le projet **DEEP IMPACT** permet de reconsidérer les pratiques agricoles qui ont longtemps négligé le rôle des micro-organismes dans la protection et la santé des cultures. Il vise non seulement à mobiliser le microbiote des plantes pour accroître leur résilience aux bioagresseurs, mais également à imaginer de nouvelles solutions par l'identification et la caractérisation de communautés microbiennes fonctionnelles bénéfiques et la création de consortia microbiens synthétiques, posant ainsi les bases pour la sélection de variétés favorisant ces interactions bénéfiques.

Ce projet apporte ainsi des solutions prometteuses pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement, en proposant des pratiques adaptées aux spécificités locales et en réduisant la dépendance aux pesticides, tout en conciliant innovation scientifique, durabilité et performance agricole.

## ► Références

- « Gis Sol », Les Sols Dominants de France Métropolitaine ». <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-sols-dominants-de-france-metropolitaine-1491>.
- Daniel Joly, Thierry Brossard, Hervé Cardot, Jean Cavailhes, Mohamed Hilal, et Pierre Wavresky. « Les types de climats en France, une construction spatiale ». *Cybergeo: European Journal of Geography* (2010). <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Christophe Mougel ([christophe.mougel@inrae.fr](mailto:christophe.mougel@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protger-autrement.fr/les-projets/deep-impact>

# FAST - FACILITER L'ACTION PUBLIQUE POUR SORTIR DES PESTICIDES

## ► Contexte

Au cours des dernières années, plusieurs types de mesures ont été mises en œuvre par les pouvoirs publics pour réduire l'utilisation des pesticides sur le territoire français : l'interdiction de l'usage de certains produits phytosanitaires, les aides agro-environnementales de la Politique Agricole Commune, ou encore les programmes de démonstration et d'assistance technique dans le cadre du Plan Ecophyto.

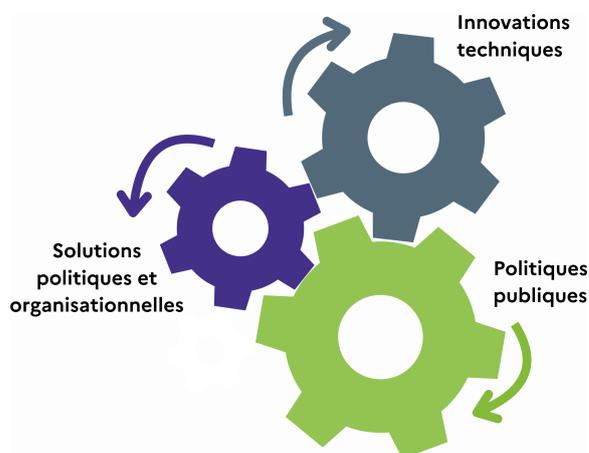
A ce jour, ces actions n'ont pas permis d'atteindre les objectifs environnementaux fixés par les autorités publiques. Il existe toutefois des instruments, ou combinaisons d'instruments, non encore mobilisés en France et susceptibles de déclencher une transition à grande échelle vers une agriculture sans pesticides.

Le projet **FAST** vise à fournir un cadre théorique et des preuves empiriques de l'efficacité de plusieurs actions publiques susceptibles d'être mises en œuvre par les décideurs publics pour soutenir cette transition. Il a pour but de fournir des solutions directement applicables par les acteurs de la transition.

## ► Stratégies déployées

Le projet **FAST** cherche à analyser les raisons pour lesquelles la majorité des agriculteurs français continuent d'utiliser des pesticides et n'adoptent pas de pratiques alternatives.

Il propose de tester l'efficacité des leviers susceptibles de favoriser une transition à grande échelle, partant de l'idée que les solutions techniques seules ne suffisent pas et doivent être accompagnées de solutions politiques et organisationnelles. Ces solutions sont la courroie de distribution entre les politiques environnementales mises en œuvre par les décideurs publics et capables d'agir pour soutenir l'effort de transition, et les solutions techniques, développées notamment par les autres projets du programme.



▲ **Décryptage des enjeux.**

© Julie Subervie, Myriam Tisserand.

Doté d'un consortium spécialisé en sciences sociales, le projet mobilise les méthodes les plus avancées en économie, gestion, droit et sociologie, et produit des analyses le plus souvent quantitatives, c'est-à-dire basées sur des données originales collectées sur le terrain.



### ▲ Stratégies du projet FAST.

© Julie Subervie, Myriam Tisserand.

La stratégie du projet repose sur quatre piliers : considérer la diversité des acteurs de la transition à différents échelons, décortiquer les mécanismes spatiaux et collectifs, concevoir et tester de nouveaux instruments, expérimenter ces instruments sur le terrain.

#### 1. Considérer la diversité des acteurs clés à différents échelons

Alors que les projets dédiés à la transition agricole portaient jusqu'ici sur les agriculteurs uniquement, le projet **FAST** propose d'étudier les leviers de la transition à une échelle plus macro. Cela nécessite d'étudier les effets d'équilibre de marché, c'est-à-dire les ajustements de prix qui égalisent l'offre et la demande, en tenant compte des accords commerciaux internationaux, afin de pouvoir quantifier les effets globaux de la transition.

#### 2. Décortiquer les mécanismes spatiaux et collectifs

Une caractéristique importante de la lutte antiparasitaire est sa dimension spatiale. La décision de passer à une production sans pesticides peut être individuelle, toutefois, pour des raisons à la fois biophysiques et socio-économiques, elle fait nécessairement partie d'un processus collectif. Le projet **FAST** étudie la coordination spatiale des acteurs de la transition, et notamment la présence d'effets de pairs dans les réseaux d'agriculteurs, afin de mieux comprendre comment les individus interagissent et s'influencent dans le processus de transition.

#### 3. Concevoir et évaluer de nouveaux instruments

Le projet **FAST** vise à concevoir et tester l'efficacité de nouveaux instruments susceptibles de déclencher une transition agricole. Pour cela, il mobilise les méthodes d'évaluation d'impact les plus avancées, basées sur la modélisation, la microéconométrie (étude des comportements individuels grâce à des méthodes statistiques), la programmation mathématique, ou encore l'économie expérimentale, qui permet de reconstituer en laboratoire des contextes de décision économique. Ces méthodes permettent de produire des preuves robustes de l'efficacité des solutions proposées, facilitant ainsi l'élaboration de politiques publiques adaptées.

#### 4. Expérimenter sur le terrain avec les acteurs clés

Le projet **FAST** cherche à mobiliser les acteurs de la transition pour la production de solutions nouvelles. Il privilégie l'approche participative, qui permet de confronter les prédictions théoriques aux réalités du terrain. En pratique, il met en œuvre des essais contrôlés randomisés dans lesquels les acteurs de la transition testent des protocoles dans le monde réel, ou encore des jeux sérieux, dans lesquels les acteurs de la transition sont invités à se projeter dans des situations hypothétiques.

## ► Avancées

Depuis son lancement, le projet a produit une série de résultats qui alimentent quatre propositions : (1) l'identification des nouveaux obstacles à la transition ; (2) des mesures visant à forcer l'adoption de nouvelles pratiques ; (3) des mesures visant à compenser l'effort environnemental au juste prix ; (4) des mesures reposant sur des leviers collectifs.

### Identifier les nouveaux obstacles à la transition

Le projet **FAST** s'est intéressé aux obstacles à la transition tels qu'ils se posent dans le contexte actuel et a pu mettre en évidence à la fois leur importance et leur diversité.

**Changement climatique** : A l'aide de données récentes, le projet a estimé de manière précise l'impact du changement climatique sur les pratiques phytosanitaires d'ici 2050. Il montre ainsi que, dans le scénario intermédiaire d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5 (+4,5 W/m<sup>2</sup>), l'utilisation des pesticides augmenterait de 7 à 15 %<sup>1</sup>.

**Commerce international** : En réponse à la Commission européenne qui affirmait que réduire de moitié l'utilisation des pesticides d'ici la fin de la décennie ne perturberait pas la production agroalimentaire européenne ni les prix, le projet **FAST** a repris le modèle d'équilibre général appliqué par le ministère en charge de l'agriculture aux États-Unis (USDA) pour montrer que les effets négatifs potentiels de la réduction de l'utilisation des pesticides ont été largement sous-estimés<sup>2</sup>.

**Aversion au risque** : Le projet s'est également intéressé aux obstacles structurels à une échelle plus micro, en étudiant par exemple l'aversion au risque, une caractéristique observée chez certains agriculteurs qui, par crainte de perdre une récolte, ont recours aux pesticides. A l'aide de données issues d'enquêtes réalisées en Europe de l'Ouest et aux États-Unis, et de simulations, le projet **FAST** a montré que la façon dont on modélise l'aversion au risque joue sur les prédictions en termes d'utilisation des pesticides. Ainsi, l'aversion risque pourrait expliquer moins de 4% des dépenses en pesticides, mais jusqu'à 19% selon le modèle de comportement retenu. En revanche, le prix des pesticides reste le principal déterminant des dépenses<sup>3</sup>.

### Forcer l'adoption de nouvelles pratiques

Le projet se concentre également sur les mesures susceptibles d'être mises en œuvre pour inciter les agriculteurs à réduire significativement les quantités de pesticides. Un instrument central à la disposition des pouvoirs publics est la taxation des pesticides.

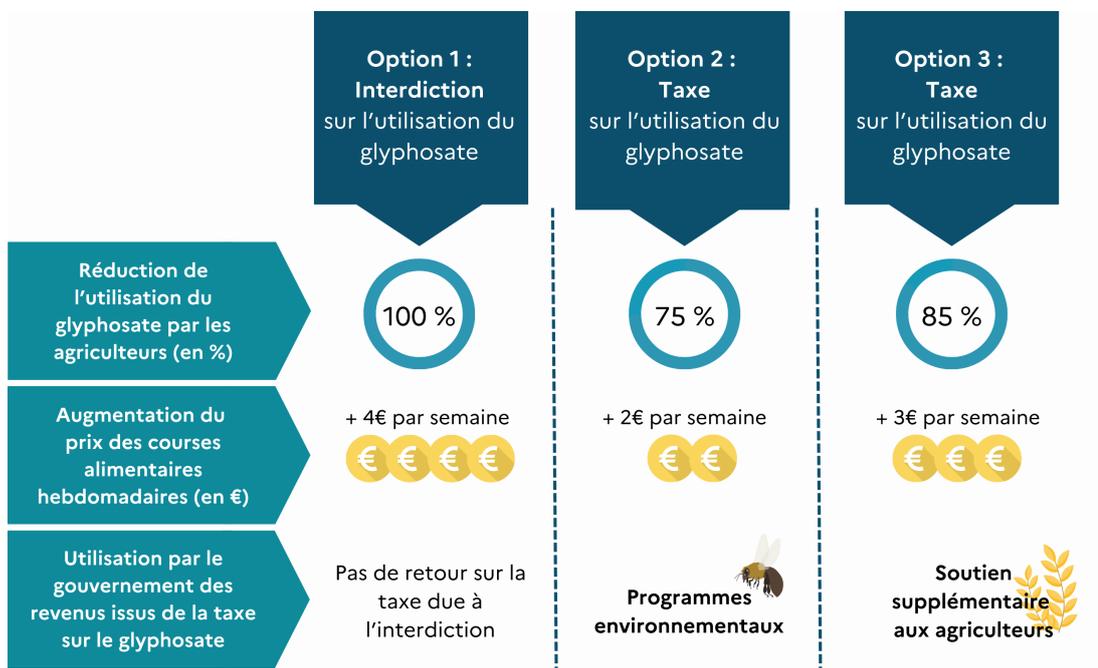
**Evaluer l'acceptabilité des mesures politiques** : Les consommateurs sont généralement favorables à la réduction des pollutions diffuses agricoles causées par les pesticides, sans pour autant accepter de payer les produits alimentaires « zéro-pesticide » plus cher. Afin de déterminer les conditions dans lesquelles une politique de réduction du glyphosate serait soutenue par les consommateurs, le projet a réalisé une expérience de choix hypothétiques auprès de 2000 individus interrogés dans cinq pays de l'Union Européenne : la France, l'Espagne, l'Italie, la Belgique et l'Allemagne. Les résultats ont révélé que 70 % des répondants préféreraient la mise en place d'une taxe sur le glyphosate plutôt que son interdiction pure et simple. Cette préférence est d'autant plus marquée que la hausse des prix des denrées alimentaires qui en découlerait resterait limitée et que le revenu de la taxe serait affecté à des programmes

1 Bareille, Chakir, et Keles, 2024, « Weather shocks and pesticide purchases ».

2 Gohin, 2024, « Halving the European farm uses of pesticides ».

3 Bontemps, Bougherara, et Nauges, 2021, « Do Risk Preferences Really Matter? ».

environnementaux ou des programmes de santé, ou bien serait directement reversé aux agriculteurs pour compenser leur effort<sup>4</sup>.



▲ **Exemple de carte de choix utilisée pour l'expérience de choix hypothétiques concernant la mise en place d'une politique de réduction du glyphosate<sup>4</sup>.**

© Julie Subervie, Myriam Tisserand, issu des résultats de Amalie Bjørnåvold, Maia David, Vincent Mermet-Bijon, Olivier Beaumais, Romain Crastes dit Sourd, Steven Van Passel, et Vincent Martinet.

**Taxer les pesticides chimiques :** A l'aide d'un modèle calibré sur des données récentes, le projet **FAST** a simulé les conséquences d'une augmentation significative des prix des pesticides via la mise en place d'une taxe par les pouvoirs publics. Les résultats ont montré que doubler le prix des produits phytosanitaires permettrait de réduire les quantités utilisées de 30 % en moyenne dans les filières grandes cultures. A technologie constante, cette opération aurait bien sûr un coût en termes de rendements et donc de revenus pour les agriculteurs. La question de la compensation de cette perte de revenus est étudiée dans l'axe du projet « Compenser l'effort au juste prix », dédié au soutien financier de l'effort environnemental apporté par les pouvoirs publics.

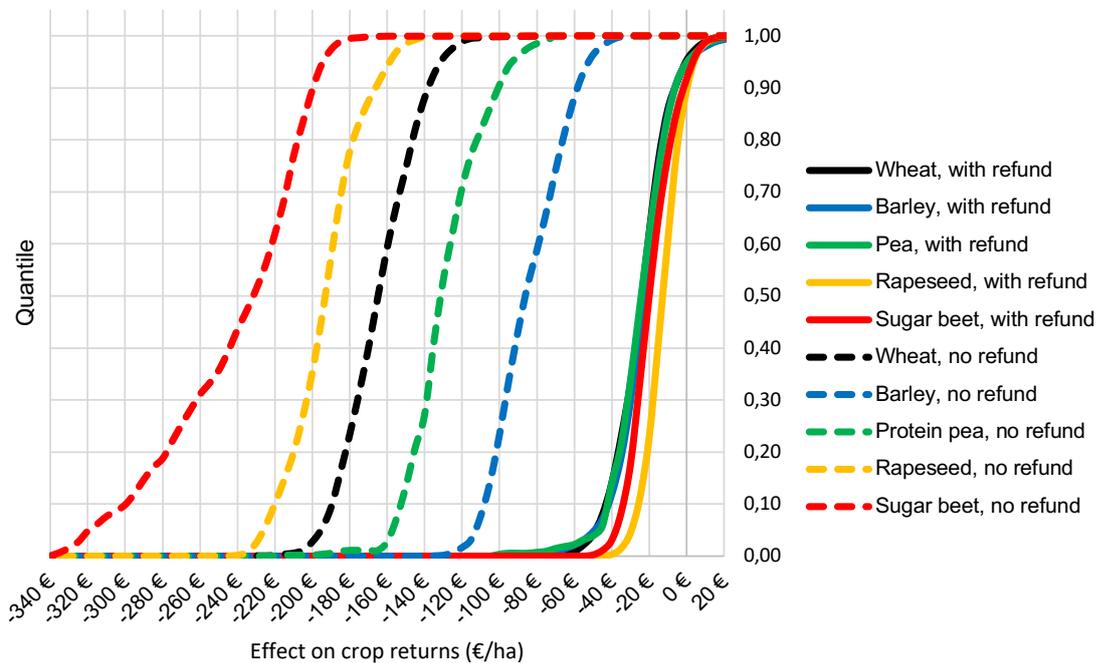
### Compenser l'effort au juste prix

Un autre axe important du projet étudie ainsi les mesures susceptibles d'être mises en œuvre par les pouvoirs publics afin de soulager les acteurs du poids de la charge financière de la transition. Afin de ne pas faire peser sur les agriculteurs le poids des mesures incitatives et des ajustements réglementaires, des mesures de rééquilibrage sont envisageables.

**Redistribuer les recettes de la taxe :** A l'aide d'un modèle calibré sur des données récentes, le projet **FAST** a simulé les conséquences d'une redistribution des recettes issues de la mise en place d'une taxe par les pouvoirs publics. Les résultats ont montré que taxer les pesticides à 100% pour ensuite redistribuer aux agriculteurs les fonds collectés, permettrait de compen-

<sup>4</sup> Bjørnåvold et al., 2023, « To Tax or to Ban? A Discrete Choice Experiment to Elicit Public Preferences for Phasing out Glyphosate Use in Agriculture ».

ser la quasi-totalité de la perte de revenus occasionnée par la baisse de rendements (environ 20 euros par hectare par moyenne en grandes cultures).



▲ **Quelles conséquences si on taxait les pesticides à 100% puis qu'on reversait la recette de la taxe aux agriculteurs ?**

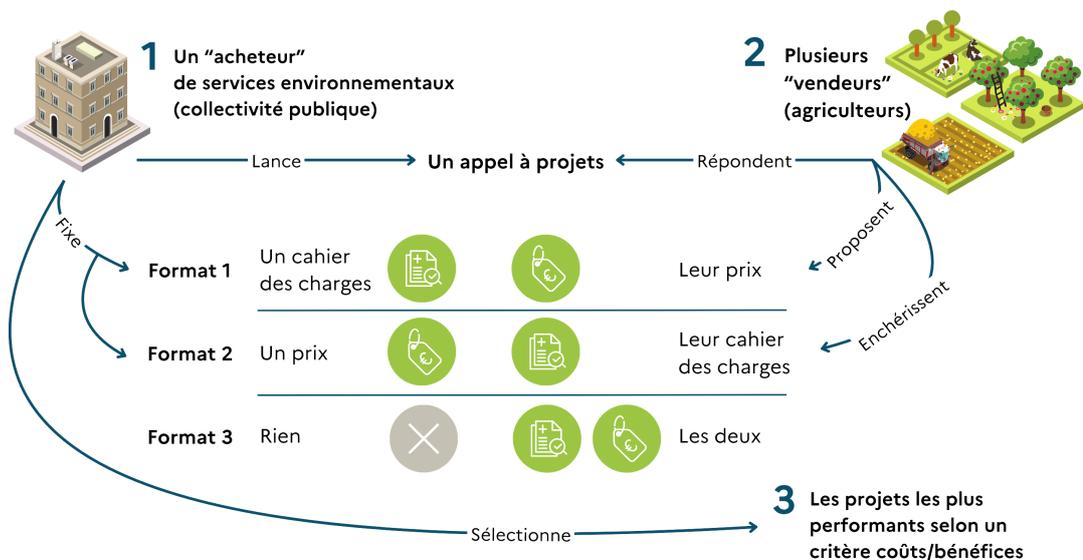
© Alain Carpentier.

Le graphique montre qu'après reversement de la taxe, la perte de revenus devient négligeable pour toutes les cultures (les courbes cumulatives se déplacent vers la droite et se superposent).

**Organiser des enchères environnementales :** Depuis de nombreuses années, les pouvoirs publics offrent des subventions aux agriculteurs qui souhaitent s'engager dans des systèmes de production plus respectueux de l'environnement. Cependant, le décideur public ne connaît pas exactement le coût individuel de chacun des agriculteurs susceptibles de s'engager. Offrir un prix uniforme peut s'avérer insuffisant pour induire le comportement souhaité, ou au contraire trop élevé et générer alors des surcompensations, limitant l'efficacité du programme.

Le projet **FAST** a réalisé des expérimentations en laboratoire auprès d'un groupe d'individus volontaires, afin de tester l'efficacité de plusieurs types d'enchères environnementales qui permettraient de rémunérer chaque agriculteur de manière plus équitable et d'augmenter ainsi l'efficacité du système de subventions. Les résultats ont permis de définir les modalités du système qui serait le plus efficace, tant d'un point de vue environnemental que financier. En outre, les résultats d'une étude supplémentaire réalisée auprès de 4000 agriculteurs suggèrent que ce système d'allocation des subventions bénéficierait d'une bonne acceptabilité auprès des agriculteurs français<sup>5</sup>.

5 Coiffard, Préget, et Tidball, 2023, « Target versus Budget Reverse Auctions »; Coiffard, Préget, et Tidball, 2024, « Conservation Auctions »; Jean-Marie et Tidball, 2024, « Equilibrium Bids for Reverse Auctions When the Budget Is Announced - Some Preliminary Results ».



### ▲ Illustration des trois formats d'enchères environnementales.

© Myriam Tisserand, d'après le « Mini-guide pour la mise en place et l'évaluation de politiques agro-environnementales innovantes » par Douadia Bougherara, Lisette Ibanez, Margaux Lapierre, Gwenolé Le Velly, Raphaële Préget, Alexandre Sauquet et Sophie Thoyer.

## Actionner les leviers collectifs

Enfin, le projet **FAST** étudie les leviers susceptibles d'être actionnés pour déclencher une transition à grande échelle. Ces travaux reposent souvent sur des approches collaboratives, impliquant les acteurs de la transition dans des protocoles expérimentaux testés sur le terrain, en jouant sur les dynamiques collectives existantes, ou en les créant de toutes pièces, dans le but de faciliter la diffusion à grande échelle des nouvelles connaissances et des nouvelles pratiques.

## FOCUS

Le réseau **DEPHY FERME** rassemble aujourd'hui 2000 agriculteurs qui se sont engagés volontairement à tester des systèmes de production économes en pesticides tout en maintenant, autant que possible, leurs performances économiques. Les fermes participantes de ce réseau testent des pratiques et techniques alternatives pour ensuite les transférer et les diffuser largement dans le milieu agricole. Le projet **FAST** a évalué l'efficacité des deux leviers de la transition qui caractérisent ce réseau : (1) la formation aux nouvelles pratiques via un accompagnement technique et (2) la transmission des nouvelles connaissances au-delà du périmètre des fermes du réseau.

**Exploiter les réseaux de pairs :** La diffusion des innovations par les pairs est une composante essentielle de la transition car elle contribue à la généralisation des nouvelles connaissances parmi les agriculteurs. Le projet **FAST** a évalué les effets d'entraînement du réseau **DEPHY** mis en œuvre dans les années 2010, en se focalisant sur la diffusion des connaissances au-delà du périmètre des fermes du réseau. Les résultats montrent une amélioration significative des performances environnementales (baisse de l'Indice de Fréquence de Traitement) pour les exploitations ayant reçu les informations de seconde main, via des journées de démonstration<sup>6</sup>. Cela suggère qu'il est possible de diffuser les nouvelles connaissances de manière efficace et à moindre coût, via les réseaux de pairs déjà existants, construits sur une proximité géographique.

<sup>6</sup> Deperrois, Fadhuile, et Subervie, 2023, « Social Learning for the Green Transition Evidence from a Pesticide Reduction Policy ».



**Formaliser l'action collective locale :** Le projet étudie également les outils juridiques susceptibles d'être mobilisés afin de formaliser l'action collective localement. Les contrats d'action collective territoriale sont un exemple emblématique. Ils concernent les collaborations au sein des filières (avec les chaînes d'approvisionnement) mais aussi les collaborations horizontales (entre acteurs situés au même niveau de la chaîne de valeur). Les résultats de ces travaux suggèrent que le droit et la réglementation pourraient être utiles, afin de pousser les agents de la transition à s'organiser sur le terrain pour agir ensemble. Des contrats collectifs – et pas seulement individuels comme aujourd'hui – permettraient d'engager des masses critiques d'agriculteurs dans la transition. Le protocole d'accord du bassin du Clain en 2022 pour une meilleure gestion quantitative et qualitative de l'eau est un exemple de réussite<sup>7</sup>.

## Perspectives

Les avancées du projet **FAST** suggèrent que la transition ne pourra pas reposer sur une mesure unique à l'échelon national, mais plutôt sur une combinaison de mesures simultanées et

<sup>7</sup> Grimonprez, 2023, « L'action collective territoriale: chaînon manquant politique de la transition agroécologique ».

complémentaires à différents échelons (local, national, européen). Les travaux en cours et les perspectives incluent un grand nombre de travaux qui viendront consolider la proposition actuelle. Ils incluent notamment : l'apprentissage social comme levier de diffusion des nouvelles connaissances, l'apprentissage collectif comme moyen de coordonner les actions à l'échelle d'un territoire, les mécanismes assurantiels, les contrats européens innovants, les clauses miroirs.

## ► Références

- François Bareille, Raja Chakir, et Derya Keles. « Weather shocks and pesticide purchases ». *European Review of Agricultural Economics* 51, no 2 (2024). <https://doi.org/10.1093/erae/jbae008>.
- Amalie Bjørnåvold, Maia David, Vincent Mermet-Bijon, Olivier Beaumais, Romain Crastes dit Sourd, Steven Van Passel, et Vincent Martinet. « To Tax or to Ban? A Discrete Choice Experiment to Elicit Public Preferences for Phasing out Glyphosate Use in Agriculture ». *PLOS ONE* 18, no 3 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283131>.
- Christophe Bontemps, Douadia Bougherara, et Céline Nauges. « Do Risk Preferences Really Matter? The Case of Pesticide Use in Agriculture ». *Environmental Modeling & Assessment* 26, no 4 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09756-8>.
- Adrien Coiffard, Raphaële Préget, et Mabel Tidball. « Conservation Auctions: An Online Double Constraint Reverse Auction Experiment » (2024). <https://hal.inrae.fr/hal-04189991>.
- Adrien Coiffard, Raphaele Preget, Mabel Tidball. « Target versus Budget Reverse Auctions: An Online Experiment Using the Strategy Method » (2023). <https://hal.inrae.fr/hal-04055743>.
- Rose Deperrois, Adélaïde Fadhuile, et Julie Subervie. « Social Learning for the Green Transition Evidence from a Pesticide Reduction Policy » (2023). <https://hal.inrae.fr/hal-04223356>.
- Alexandre Gohin. « Halving the European farm uses of pesticides: Looking for alternative technologies ». *Q Open* 4, no 1 (2024). <https://doi.org/10.1093/qopen/qoae003>.
- Benoît Grimonprez. « L'action collective territoriale: chaînon manquant politique de la transition agroécologique » (2023).
- Alain Jean-Marie, et Mabel Tidball. « Equilibrium Bids for Reverse Auctions When the Budget Is Announced - Some Preliminary Results ». Report, Inria ; CEE-M. Centre d'Economie de l'Environnement - Montpellier (2024). <https://inria.hal.science/hal-04520388>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Julie Subervie ([julie.subervie@inrae.fr](mailto:julie.subervie@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/fast>

# MOBIDIV - MOBILISER ET SÉLECTIONNER LA DIVERSITÉ CULTIVÉE INTRA ET INTER-SPÉCIFIQUE POUR UN CHANGEMENT SYSTÉMIQUE VERS UNE AGRICULTURE SANS PESTICIDES

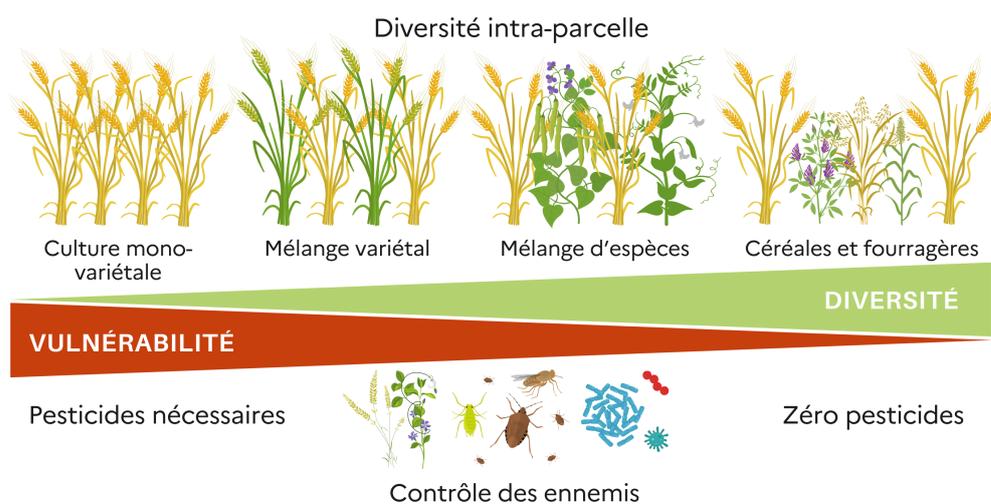
## Contexte

La diversification est un des leviers majeurs pour réduire les pesticides. Le déploiement de cultures diversifiées, performantes sur le plan agronomique, rentables économiquement et durables pour l'environnement, suppose des changements à différents niveaux : adaptation de la sélection, de la production et de la commercialisation des semences ; évolution du cadre réglementaire, de l'évaluation et du conseil ; actions coordonnées des acteurs pour diversifier les cultures et améliorer le contrôle des bioagresseurs ; et valorisation de la production par les entreprises de l'aval.

La mission du projet **MOBIDIV** est de créer des méthodes et des outils pour sélectionner, assembler, inscrire et évaluer de nouvelles formes variétales, les mélanges de variétés et d'espèces, pour une agriculture sans pesticides.

## Stratégies déployées

Le projet **MOBIDIV** se base sur un des principes majeurs en agroécologie selon lequel la diversité intra-parcelle maximise les régulations naturelles et réduit ainsi la dépendance aux pesticides.

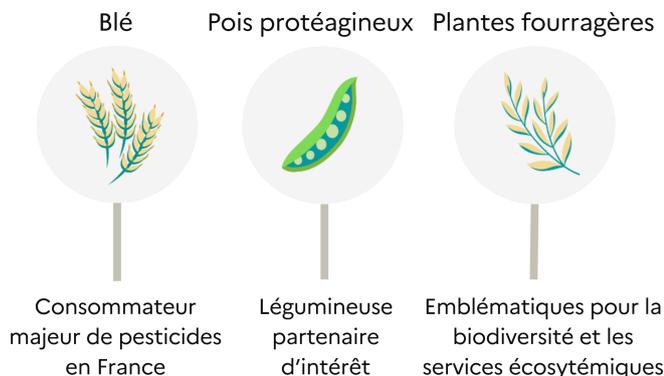


### ▲ Effet de la diversité Intra-parcellaire sur la réduction d'usage des pesticides.

© Jean-Benoît Morel, Myriam Tisserand.

La diversification intra-parcelle permet de réduire la vulnérabilité des cultures aux bioagresseurs et ainsi l'usage de pesticides.

Le projet s'intéresse aux mélanges céréales-légumineuses et aux mélanges de variétés de céréales, dans des systèmes de grandes cultures. Les principales espèces travaillées en mélanges sont le blé, le pois et les plantes fourragères.



**▲ Plantes modèles étudiées dans le projet MOBIDIV.**

© Myriam Tisserand.

Le projet est fortement interdisciplinaire et s'articule autour de cinq axes de travail pour répondre aux questions liées à la diversification aux différentes échelles de l'agroécosystème : gènes, plantes, communautés, champs, entreprises et territoires.

## MOBiDiv



**▲ Axes scientifiques du projet MOBIDIV.**

© Aline Fugerey-Scarbel, Jérôme Enjalbert, Myriam Tisserand.

## ► Avancées

### État des lieux de l'évolution des surfaces en mélange en France et leur impact sur l'usage des pesticides

Les surfaces cultivées en mélanges ont augmenté depuis 2015. Cette augmentation est bien plus marquée pour les mélanges variétaux que pour les mélanges d'espèces<sup>1</sup>.

1 D'après Yan et al., 2024, « Intercropping on French Farms: Reducing Pesticide and N Fertiliser Use While Maintaining Gross Margins » ; Données issues des Enquêtes variétés FranceAgriMer, 2015-2020 ; Enquêtes variétés Arvalis, 2021-2023 ; Registres parcellaires graphiques, 2015-2021.

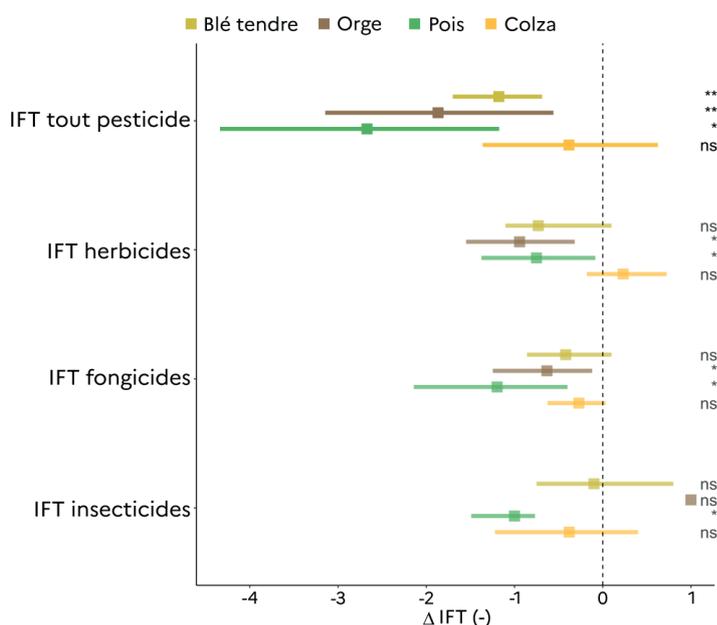
- Mélanges variétaux : Surfaces multipliées par 7,5 (de 2015 à 2023) avec, en 2023, 19,5% des surfaces de blé tendre cultivées en mélanges de variétés (soit 923 000 hectares).
- Mélanges d'espèces : Surfaces multipliées par 2,2 (de 2015 à 2021) avec, en 2021, 3,3% des terres labourables, toutes cultures confondues.

## Impact des mélanges de cultures sur l'usage des pesticides en conditions agricoles

L'impact des mélanges sur la réduction d'usage des produits phytosanitaires a été analysé à partir du système d'information Agrosyst qui regroupe les résultats des agriculteurs engagés dans les groupes du réseau DEPHY Ferme. Ces résultats ont été complétés par des enquêtes en exploitation.

**Les mélanges de variétés de blé** peuvent conduire à des réductions de l'Indicateur de Fréquence de Traitements (IFT) fongicides par rapport à une conduite en variété pure, mais sans que cela soit systématique chaque année. Par ailleurs, si on considère l'IFT pour tous les pesticides, on ne relève aucune différence significative entre conduite en mélange et conduite en variété pure. Les IFT du blé dans Agrosyst (IFT de 4.0) sont plus faibles que la moyenne française (IFT de 5.1 dans l'Enquête pratiques culturales en grandes cultures de 2021), ce qui traduit l'activation par les agriculteurs des groupes DEPHY de leviers d'action autres que celui des mélanges variétaux.

**Les mélanges d'espèces** permettent des réductions conséquentes d'IFT de 40 à 72% dans le cas des mélanges céréales-légumineuses. On ne note pas de réduction significative sur le colza, dont les mélanges sont majoritairement sur le modèle colza-plantes compagnes non récoltées.



### ▲ Différences d'IFT entre cultures pures de blé tendre, orge, pois et colza, et mélanges d'espèces à base de blé tendre, orge, pois, et colza dans le réseau DEPHY Fermes <sup>2</sup>.

© Elodie Yan.

Une valeur négative indique un IFT plus faible dans le cas du mélange d'espèces, avec « ns » : différence non significative.

<sup>2</sup> Adapté de Yan et al., 2024, « Intercropping on French Farms: Reducing Pesticide and N Fertiliser Use While Maintaining Gross Margins ».

## Déterminants du recours aux mélanges par les agriculteurs

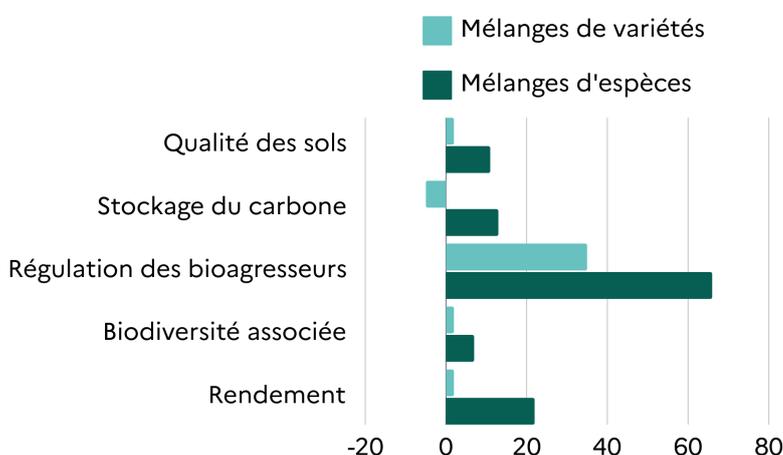
Les arguments avancés dans nos enquêtes par les agriculteurs et agricultrices pour l'adoption des mélanges variétaux de blé sont la simplification des opérations culturales, la sécurisation des rendements ainsi que la lutte intégrée contre les bioagresseurs. Pour les mélanges d'espèces, notamment en agriculture biologique, les arguments portent sur la production de légumineuses qui est facilitée et associée à la réduction des charges et à l'autonomisation des exploitations.

L'analyse du recensement agricole de 2020 au niveau national montre que la culture de mélanges d'espèces est associée à la conduite en agriculture biologique, à la capacité de stockage de grains à la ferme, à la présence d'animaux d'élevage, à une plus forte autonomie alimentaire des élevages ainsi qu'à l'appartenance à des collectifs de type CUMA (Coopérative d'utilisation des matériels agricoles). Le résultat des enquêtes montre par ailleurs un besoin d'accompagnement et d'échanges entre pairs pour lever des freins cognitifs à la mise en place de mélanges d'espèces. On note aussi une évolution des types de mélanges mis en œuvre en fonction de l'évolution des besoins et de l'expérience des agriculteurs et agricultrices.

## Identification des mécanismes d'interaction plante-plante et impact sur le contrôle des ravageurs, adventices et maladies

Les mélanges multi-variétés et/ou multi-espèces montrent des effets aux bénéfices variables pour plusieurs services d'intérêt et pour différents bioagresseurs. On peut ainsi parler de multi-performance des mélanges dans la transition des systèmes agricoles.

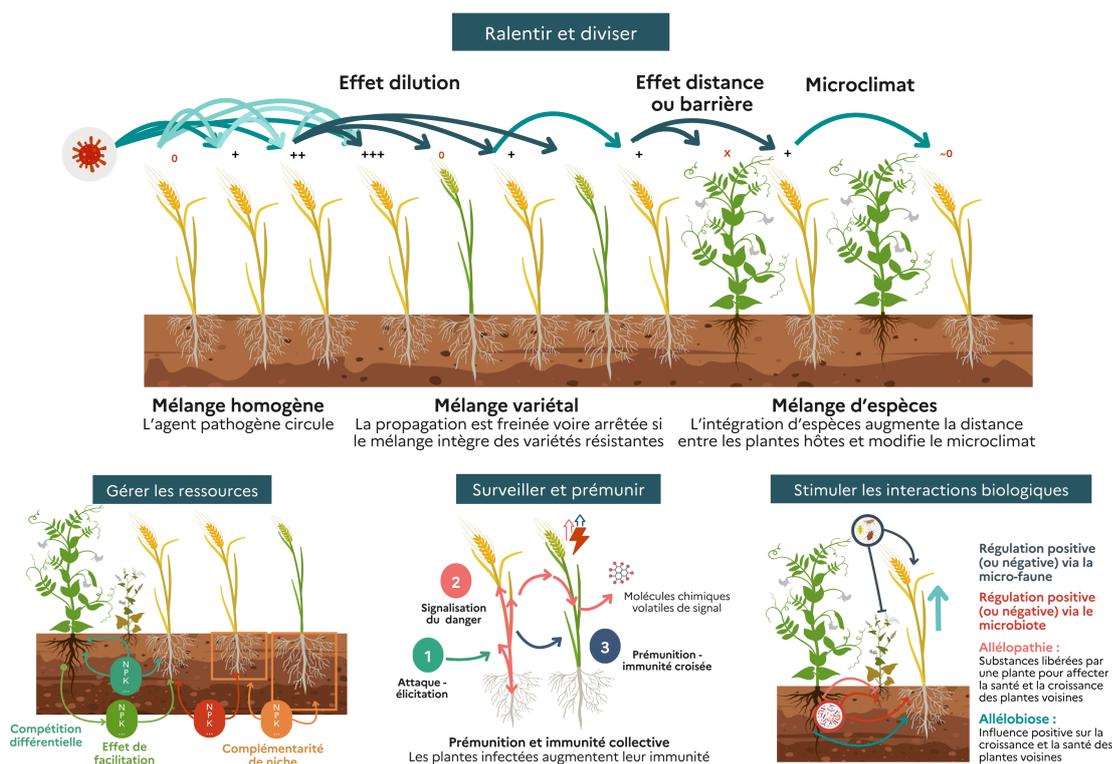
Un des objectifs du projet est donc de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces performances pour maximiser les impacts positifs des mélanges intra-parcellaires, notamment sur la régulation des bioagresseurs.



### ▲ La multi-performance des mélanges<sup>3</sup>.

© Jean-Benoît Morel, Myriam Tisserand.

3 D'après, Tamburini et al., 2020, « Agricultural Diversification Promotes Multiple Ecosystem Services without Compromising Yield » ; Beillouin et al., 2020, « Positive but Variable Effects of Crop Diversification on Biodiversity and Ecosystem Services » ; Vialatte et al., 2023, « Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Rapport scientifique de l'Expertise scientifique collective ».



### ▲ Mécanismes en jeu dans les interactions plantes-plantes au sein des mélanges.

© Jean-Benoît Morel, Myriam Tisserand.

Le dialogue inter-plantes au sein de couverts hétérogènes est piloté par des interactions entre de nombreux traits végétaux et facteurs environnementaux. Quatre grands types de mécanismes peuvent être identifiés comme responsables des performances des mélanges : Ralentir et diviser, Gérer les ressources, Surveiller et prémunir, Stimuler les interactions biologiques. L'identification des traits qui favorisent l'aptitude au mélange des espèces et génotypes cultivés et/ou la régulation des adventices, est nécessaire pour optimiser la régulation des bio-agresseurs.

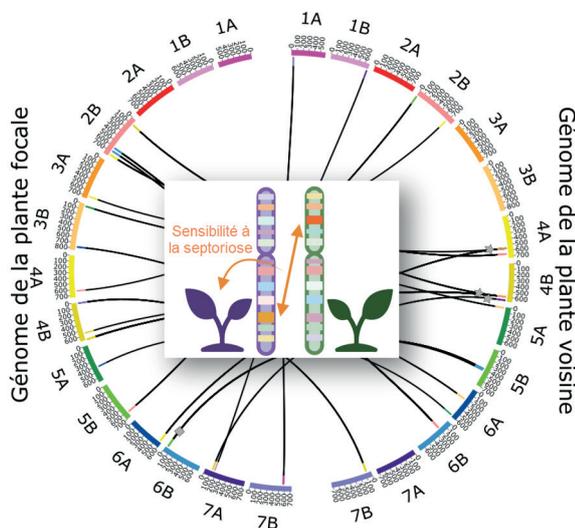
Au sein du projet, par des approches de modélisation basées sur les traits fonctionnels des cultures, le modèle FlorSys a permis d'identifier les traits clés du pois impliqués dans la régulation des adventices dans les mélanges blé-pois, grâce à des simulations tenant compte des dernières actualisations du modèle (et intégrant également comme facteur la compétition pour l'eau).

Parallèlement, par des approches génétiques et moléculaires explorant les mécanismes sous-jacents aux interactions plantes-plantes, le projet a identifié des idéotypes variétaux (i.e. des combinaisons de traits variétaux optimisant la performance des mélanges de variétés), des régions génomiques et des génotypes qui contribuent à ces régulations. L'analyse de tous les mélanges binaires possibles entre 12 variétés de blé tendre ou entre 9 variétés de blés dur montre que certains mélanges sont meilleurs que d'autres pour la résistance à la septoriose<sup>4</sup>. Une analyse

La GWAS, ou Genome-Wide Association Study (étude d'association pangénomique), est une méthode pour identifier des variations génétiques associées à des traits spécifiques, comme la résistance aux maladies, en comparant les génomes de différentes plantes. Contrairement à une GWAS classique qui examine l'effet des gènes d'une plante sur un trait donné, la co-GWAS analyse la variabilité d'un trait sous l'effet de l'interaction des génomes de deux plantes associées pour découvrir des associations génétiques responsables des traits mesurés.

<sup>4</sup> Mathieu et al., 2024, « Plant-Plant Interactions in Wheat Mixtures Modulate Mean and Variance of Susceptibility to Septoria Tritici Blotch ».

d'association utilisant la méthode co-GWAS sur mélanges de blé dur a par ailleurs permis d'identifier plusieurs couples de loci (régions génomiques) contrôlant la résistance à la septoriose. Ce sont ces combinaisons de gènes identifiées qu'il s'agira d'associer dans les mélanges pour rendre ces derniers plus performants.



▲ Illustration de l'analyse co-GWAS.

© Laura Mathieu.

## Evaluation au champ de l'impact de la diversification sur le contrôle des bioagresseurs

Essai	Mélanges	Cultures	Etudes	Modalités étudiées
Saclay	Variétés	Blé tendre	Septoriose	4 génotypes de blé tendre, 6 mélanges binaires
Rennes	Espèces	Blé tendre - Pois	Maladies foliaires, adventices, rendement	4 génotypes de blé tendre, 4 génotypes de pois soit 16 mélanges bispécifiques
Lusignan	Espèces	Blé tendre - Luzerne	Septoriose	2 génotypes de blé tendre, 30 populations de luzerne
Clermont Ferrand	Espèces	Blé tendre - Prairie	Maladies foliaires, nutrition azotée, cycle de l'azote, émissions carbone, GES	4 génotypes de blé tendre + le mélange des 4 génotypes, 4 types de prairie soit 20 mélanges plurispécifiques
Montpellier	Variétés	Blé tendre Blé dur	Maladies foliaires, adventices, rendement	2 génotypes de blé dur, 2 génotypes de blé tendre, 2 mélanges binaires (1 mélange blé tendre, 1 mélange blé dur)

▲ Tableau des essais et des modalités testées.

© Nathalie Moutier, Myriam Tisserand.

Dans les mélanges de variétés de blé, on note un effet de contrôle sur la septoriose, qui dépend de la densité de semis. La maladie influence les relations de compétition au sein du mélange, réduisant le poids de mille grains (PMG) de la variété sensible. Ces interactions compétitives peuvent également contribuer à la régulation de l'agressivité des populations pathogènes.

Dans les mélanges blé-pois, on constate une aptitude au mélange différente entre variétés de blé. De plus, les variétés de pois diffèrent par leur capacité à discriminer les variétés de blé pour cette aptitude<sup>5</sup>.

Dans les mélanges blé-luzerne, une forte concurrence de la luzerne est observée. Cependant, l'impact sur le blé au fil des stades de développement peut être modulé par des idéotypes de luzerne sélectionnés pour leur croissance et leur niveau de dormance.

## Conception de méthodes pour sélectionner et concevoir des mélanges (variétés et espèces)

Une nouvelle méthode de calibration automatique et multi-paramètres pour les modèles éco-physiologiques a été élaborée dans le projet, permettant d'améliorer la précision des simulations<sup>6</sup>. Un outil a également été développé pour coupler différents modèles éco-physiologiques, facilitant ainsi la simulation des mélanges d'espèces.

Par ailleurs, une modélisation statistique des interactions génotype-environnement a été mise en place pour comparer les variétés au sein des réseaux de sélection participative, souvent caractérisés par des dispositifs très déséquilibrés, avec peu ou pas de répétitions.

L'ensemble de ces avancées contribue à une meilleure compréhension et gestion des interactions complexes entre les espèces et leur environnement.

## Conception d'outils et de politiques pour l'implication des acteurs économiques dans une stratégie de diversification

Pour accompagner l'innovation au niveau des exploitations agricoles, un prototype d'outil d'aide à la conception de mélanges céréales-légumineuses a été développé<sup>7</sup>. Par ailleurs, une méthode de conception collective adaptée au contexte des semences paysannes a été proposée : l'objectif est de produire des connaissances et d'accompagner des collectifs sur le terrain pour l'assemblage, la gestion et la sélection de peuplements diversifiés adaptés aux contextes locaux.

Au niveau des entreprises de la filière semences, les premières enquêtes montrent qu'en l'absence d'une réglementation rendant obligatoire l'évaluation de la performance des mélanges de semences commercialisés, les acteurs mettent en place certaines initiatives pour mieux connaître ces performances. Ces initiatives restent cependant très limitées.

## ► Perspectives

Pour accompagner la transition agroécologique, le projet **MOBIDIV** propose une approche holistique, intégrant la diversité comme levier central de la réduction des pesticides. Ses premiers résultats mettent en lumière les effets de l'utilisation de mélanges (mélanges variétaux, mélanges d'espèces) face à différents bioagresseurs (adventices, maladies et parasites). Le projet permet ainsi d'évaluer les conditions de réussite des mélanges afin d'en maximiser les bénéfices.

5 Moutier et al., 2022, « Mixing Ability of Intercropped Wheat Varieties ».

6 Blanc et al., 2023, « Efficient Bayesian Automatic Calibration of a Functional-Structural Wheat Model Using an Adaptive Design and a Metamodelling Approach ».

7 Ouattara, 2023, « Mélanger les espèces pour produire des services écosystémiques ».

Les travaux montrent que la diversification des cultures ne se limite pas à une évolution des pratiques culturales seule mais nécessite bien une reconfiguration complète des systèmes agro-alimentaires, de la production à la commercialisation, en passant par la transformation et la distribution. C'est pourquoi le projet vise également à adapter les cadres réglementaires, à améliorer la coordination entre les acteurs du secteur agricole et à optimiser les outils de sélection et d'évaluation, pour que la diversification intra-parcelle devienne un levier de transformation à grande échelle.

## ► Références

- Damien Beillouin, Tamara Ben-Ari, Eric Malézieux, Verena Seufert, et David Makowski. « Positive but Variable Effects of Crop Diversification on Biodiversity and Ecosystem Services ». *Global Change Biology* 27, no 19 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>.
- Emmanuelle Blanc, Jérôme Enjalbert, Timothée Flutre, et Pierre Barbillon. « Efficient Bayesian Automatic Calibration of a Functional-Structural Wheat Model Using an Adaptive Design and a Metamodelling Approach ». *Journal of Experimental Botany* 74, no 21 (2023). <https://doi.org/10.1093/jxb/erad339>.
- Laura Mathieu, Aurélie Ducasse, Elsa Ballini, et Jean-Benoît Morel. « Plant-Plant Interactions in Wheat Mixtures Modulate Mean and Variance of Susceptibility to Septoria Tritici Blotch ». *bioRxiv* (2024). <https://doi.org/10.1101/2024.08.26.609704>.
- N. Moutier, A. Baranger, S. Fall, E. Hanocq, P. Marget, M. Floriot, et A. Gauffreteau. « Mixing Ability of Intercropped Wheat Varieties: Stability Across Environments and Tester Legume Species ». *Frontiers in Plant Science* 13 (2022). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.877791>.
- Malick Sidiki Ouattara. « Mélanger les espèces pour produire des services écosystémiques : co-conception d'un prototype d'outil d'intégration et de partage des connaissances scientifiques et empiriques en mobilisant les concepts de l'écologie fonctionnelle ». Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (2023). <https://theses.fr/2023UPASB075>.
- Giovanni Tamburini, Riccardo Bommarco, Thomas Cherico Wanger, Claire Kremen, Marcel G. A. van der Heijden, Matt Liebman, et Sara Hallin. « Agricultural Diversification Promotes Multiple Ecosystem Services without Compromising Yield ». *Science Advances* 6, no 45 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>.
- Aude Vialatte, Vincent Martinet, Anaïs Tibi, Audrey Alignier, Valérie Angeon, Laurent Bedoussac, David Bohan, et al. « Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Rapport scientifique de l'Expertise scientifique collective ». Report, INRAE, (2023). <https://doi.org/10.17180/q7wm-q442>.
- Elodie Yan, Nicolas Munier-Jolain, Philippe Martin, et Marco Carozzi. « Intercropping on French Farms: Reducing Pesticide and N Fertiliser Use While Maintaining Gross Margins ». *European Journal of Agronomy* 152 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127036>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Aline Fugerey-Scarbel ([aline.fugerey-scarbel@inrae.fr](mailto:aline.fugerey-scarbel@inrae.fr)) et Jérôme Enjalbert ([jerome.enjalbert@inrae.fr](mailto:jerome.enjalbert@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/mobidiv>
- Bulletin de veille du projet :



◀ Lire le bulletin de veille du projet MOBIDIV

# PHEROSENSOR - DÉTECTER DE FAÇON PRÉCOCE LES INSECTES RAVAGEURS À L'AIDE DE CAPTEURS OLFACTIFS UTILISANT DES RÉCEPTEURS PHÉROMONAUX

## ► Contexte

Les insectes ravageurs détruisent presque un tiers des récoltes annuelles mondiales. Le dérèglement climatique et l'intensification des échanges commerciaux font de la détection précoce des insectes ravageurs invasifs un défi majeur pour la protection des cultures.

La détection des phéromones d'insectes apparaît comme une alternative prometteuse pour l'épidémiologie et la prophylaxie, mais elle représente aussi un défi en raison des faibles émissions à détecter. Actuellement, les capteurs artificiels développés ne peuvent discriminer ces composés dilués.

Le projet **PHEROSENSOR** vise à dépasser les technologies les plus avancées de détection en développant des capteurs bio-inspirés et innovants capables de détecter efficacement les insectes ravageurs des cultures.

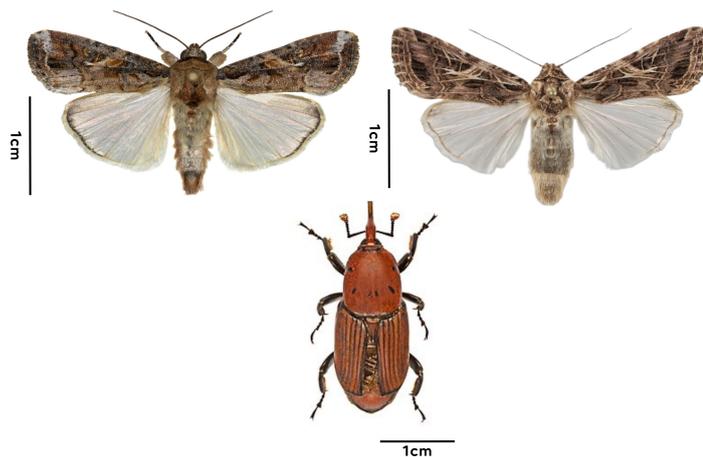
La prophylaxie se base sur la prise en compte du cycle des adventices, ravageurs et maladies, en identifiant les étapes sur lesquelles agir en vue de maintenir des trajectoires de ces populations dans des gammes acceptables.

## ► Stratégies déployées

Les insectes utilisent des phéromones spécifiques pour attirer des congénères du même sexe (phéromones sexuelles, par exemple les papillons de nuit) ou des deux sexes (phéromones d'agrégation, par exemple les charançons). Ces composés sont utilisés pour attirer les insectes dans des pièges, le nombre de captures indiquant les niveaux de population. Cette méthode de surveillance a des inconvénients : elle requiert des interventions humaines répétées (comptage et identification des captures), une diffusion de phéromones de synthèse attractives parfois chères à produire et difficile à maintenir, et des pièges adaptés aux ravageurs à recenser.

Le projet **PHEROSENSOR** considère le problème sous un autre angle : il développe des capteurs des phéromones d'insectes cibles. Ces capteurs sont basés sur les récepteurs phéromonaux (notés PR) de ces insectes, les acteurs clés de leurs performances olfactives, afin de surveiller différentes espèces nuisibles installées ou potentiellement invasives en France : 2 lépidoptères nocturnes (légionnaire d'automne, *Spodoptera frugiperda*, et noctuelle du coton, *Spodoptera littoralis*) et 1 coléoptère (charançon rouge du palmier, *Rhynchophorus ferrugineus*).

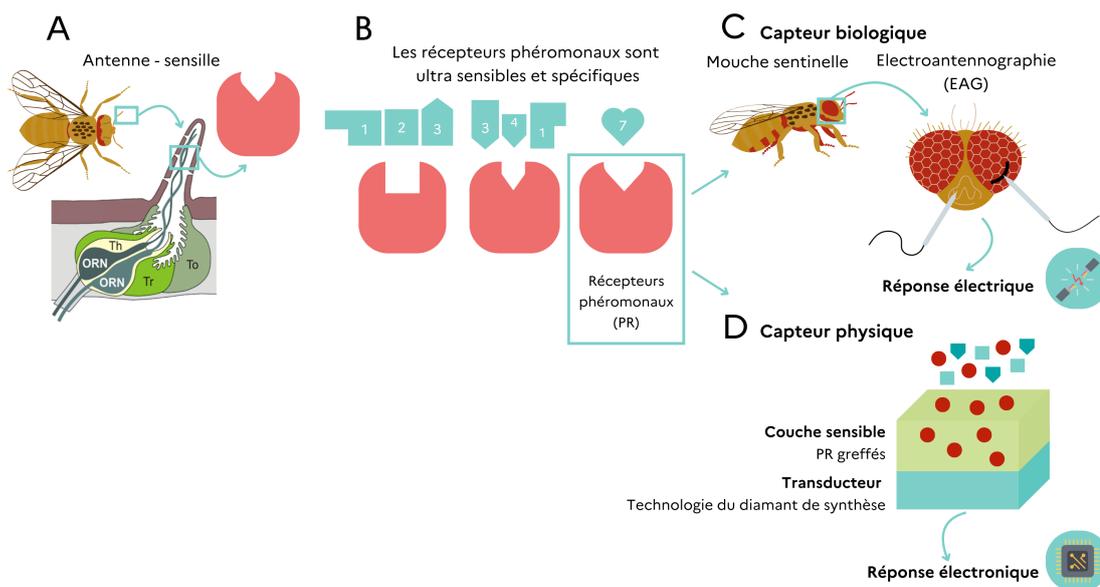
En étudiant deux ordres d'insectes différents, les coléoptères et les lépidoptères, le projet étudie une écologie et des systèmes de communication phéromonale différents, ce qui facilitera la mise en œuvre d'une nouvelle approche de capteurs pour une large gamme de ravageurs invasifs.



**▲ Espèces d'insecte étudiées dans le projet PHEROSENSOR.**

De gauche à droite, *Spodoptera frugiperda* (© Georg Goergen, 2016), *Spodoptera littoralis* (© Pierre Cabrol, 2019), *Rhynchophorus ferrugineus* (© Didier Descouens, 2013).

Les phéromones et leurs récepteurs respectifs sont identifiés pour les 3 espèces d'intérêt, permettant d'utiliser ces PR pour développer des capteurs biologiques et des capteurs physiques de phéromones.



**▲ Capteurs basés sur les récepteurs phéromonaux des insectes.**

© Philippe Lucas, Myriam Tisserand.

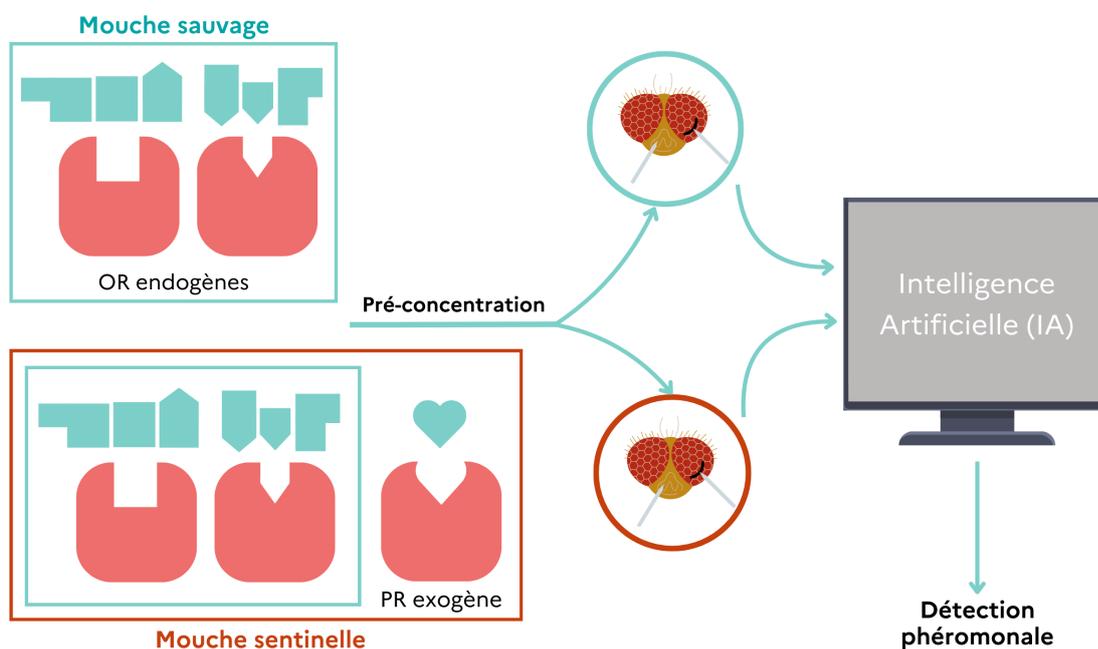
A- Les antennes des insectes sont équipées de sensilles olfactives contenant les neurones qui détectent les odeurs grâce aux récepteurs olfactifs (OR) qu'ils portent et qui leur confèrent un profil de sensibilité. B- Si les OR sont plus ou moins sensibles et en général spécifiques, ceux qui détectent les phéromones (PR) sont ultra sensibles et en général spécifiques. C- Le projet conçoit et développe deux types de capteurs phéromonaux basés sur les PR. D- Le capteur dit biologique utilise des drosophiles génétiquement modifiées pour exprimer un PR spécifique de la phéromone à détecter. La présence de phéromone est détectée en mesurant la réponse électrophysiologique d'une antenne de ces mouches dites sentinelles. D- Le capteur biologique sert de référence pour le développement du capteur physique. Ce dernier consiste en un résonateur acoustique dont la fréquence de résonance dépend de la masse présente sur sa surface. Des PR sont immobilisés sur la surface de ce résonateur (« couche sensible »). Lorsque les phéromones présentes dans l'environnement se lient de façon sélective aux PR, le gain de masse généré par les phéromones piégées sur la surface produit une variation de la fréquence de résonance convertie en un signal électrique mesurable.

L'électroantennographie (EAG) est une technique d'électrophysiologie développée sur insecte. Elle consiste à mesurer une réponse électrique d'une antenne d'un insecte en réponse à des stimuli olfactifs. La réponse est immédiate et son amplitude varie avec la concentration et la nature de l'odeur délivrée sur l'antenne. La stabilité de cette technique permet de mesurer les réponses à de nombreux stimuli et donc de dresser le profil de sensibilité olfactive d'une espèce.

## Principe de fonctionnement du capteur biologique

Pour les capteurs biologiques, des lignées de drosophiles sont établies en exprimant un PR exogène dans la majorité de leurs neurones olfactifs, leur conférant une hypersensibilité à la phéromone d'un ravageur (mouches sentinelles). Mais les mouches sentinelles conservent leurs OR endogènes et donc leur sensibilité aux autres odorants normalement détectés par les mouches sauvages. L'analyse par intelligence artificielle (IA) des réponses combinées d'une mouche sauvage et d'une mouche sentinelle permet de détecter la phéromone. Des prototypes sont développés pour 1) accumuler la phéromone émise par les insectes ravageurs et 2) quantifier les réponses des mouches sentinelles sur le terrain.

Cette preuve de concept devient la référence dans **PHEROSENSOR** pour le développement de capteurs physiques qui remplaceront à terme les capteurs biologiques basés sur la production de mouches sentinelles et des enregistrements EAG à durée de vie limitée (inférieure à 24 heures).

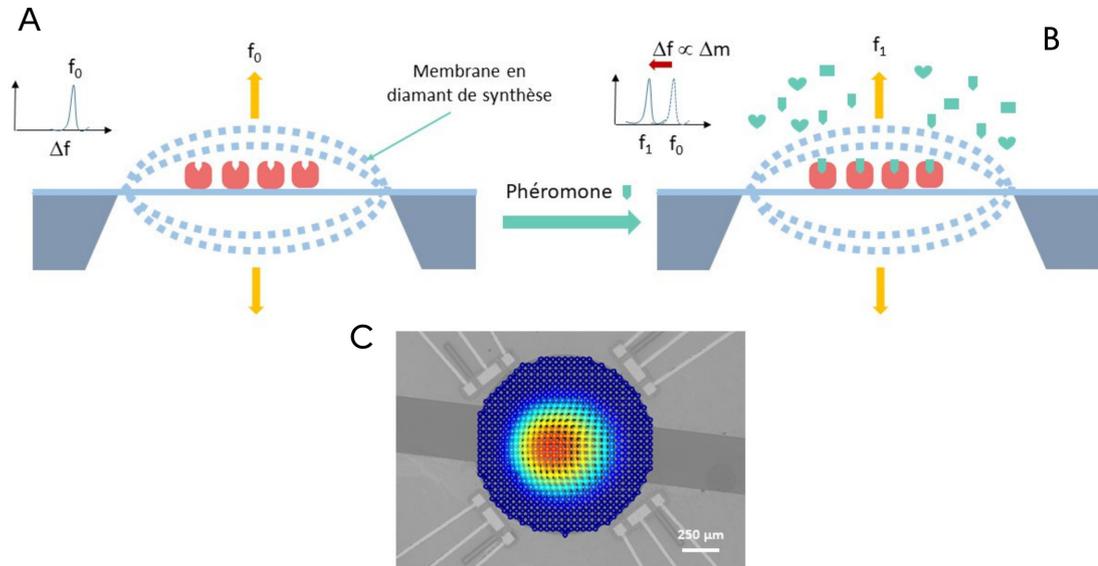


▲ Représentation schématique du capteur biologique.

© Philippe Lucas, Myriam Tisserand.

## Principe de fonctionnement du capteur physique

Les capteurs physiques intègrent une couche sensible avec des PR greffés et des transducteurs diamant, leur conférant des propriétés électroniques et physicochimiques. La production de PR de la légionnaire d'automne et leur greffage sont maîtrisés, et la sensibilité et spécificité du premier prototype de capteur physique sont en cours d'étude en laboratoire.



### ▲ Représentation schématique du capteur physique.

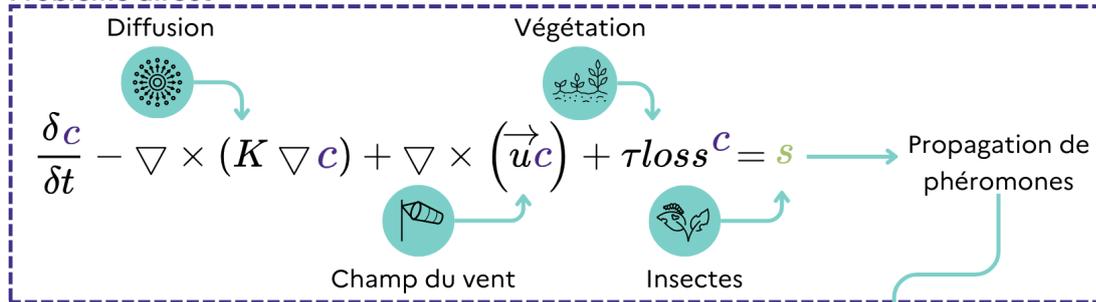
© Emmanuel Scorsone.

A- Membrane en diamant fonctionnalisée par les récepteurs phéromonaux (PR) vibrant à une fréquence de résonance  $f_0$ . B- La liaison de molécules de phéromone avec les PR immobilisés sur la surface de la membrane induit un déplacement de la fréquence de résonance ( $f_0$ ) proportionnel à la masse des phéromones piégées. C- Capture d'image d'une membrane en diamant en résonance observée au microscope optique.

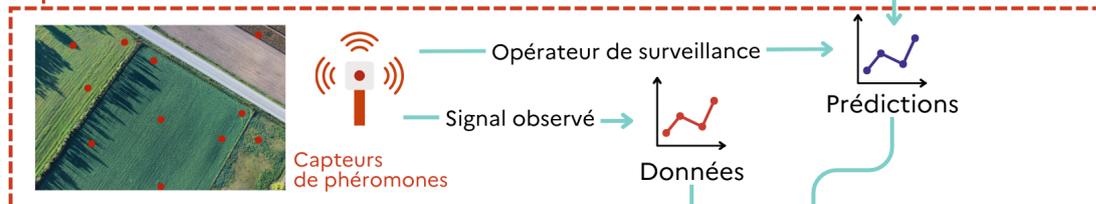
## Optimisation par la modélisation de l'utilisation des capteurs

Une modélisation de la dispersion d'un panache de phéromones dans un paysage agricole est réalisée. Ce modèle permet de mieux analyser les signaux spatio-temporels recueillis par les capteurs au champ : ils permettent de remonter le panache d'odeur du capteur jusqu'à la source d'émission afin de localiser les insectes cibles. Ce problème d'inférence étant intrinsèquement difficile, la résolution mathématique est couplée avec les connaissances biologiques sur les ravageurs afin d'améliorer la précision de leur localisation.

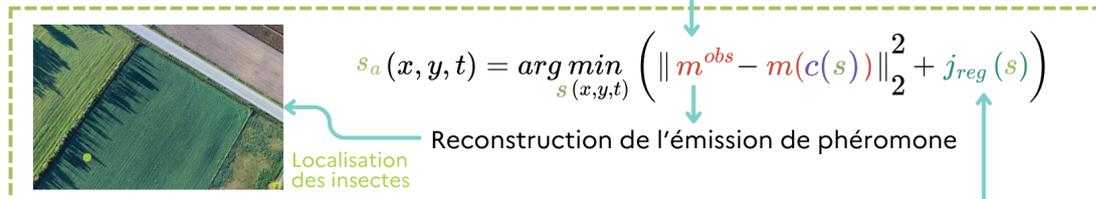
### Problème direct



### Capteurs



### Problème inverse



### Informations biologiques



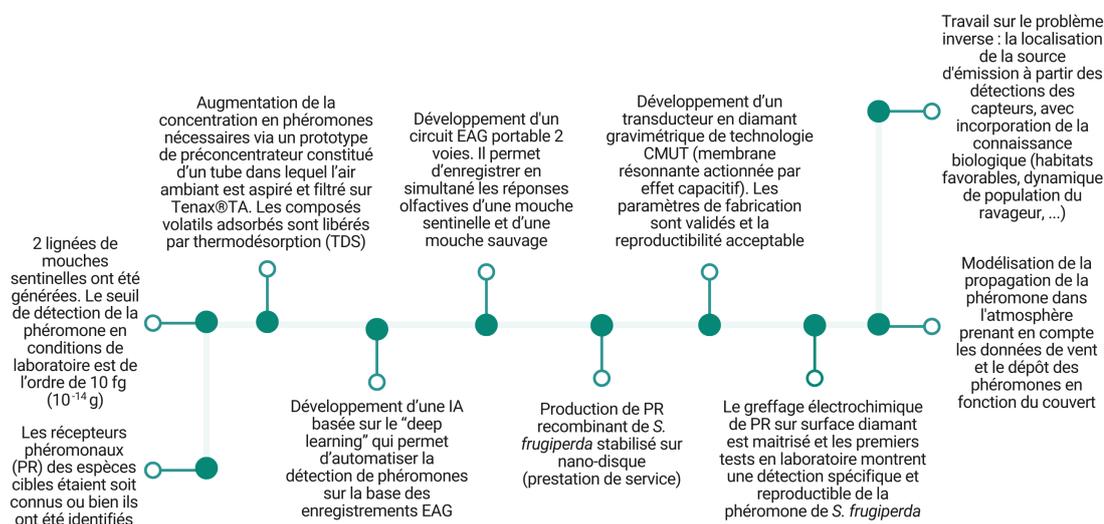
### ▲ Assimilation des données.

© Simon Labarthe, Philippe Lucas, Myriam Tisserand.

Un cadre classique d'assimilation de données (AD) se construit, combinant un modèle de propagation de phéromones (rectangle violet), des capteurs de phéromones (rectangle rouge) et une approche inverse du problème (rectangle vert). En plus de ce cadre AD classique, l'information biologique peut être complétée par des termes de régularisation spécifiques du problème (rectangle bleu-vert, en bas). Ces termes de régularisation sont les principaux éléments de cette étude.

## Avancées

Les capteurs de phéromones développés apportent de nouvelles sources de données qui peuvent être intégrées aux données météorologiques et à d'autres ressources, afin de construire des modèles de prédiction adaptés pour une agriculture de précision.



### ▲ Avancées du projet PHEROSENSOR.

© Philippe Lucas, Myriam Tisserand.

## Perspectives

A travers ce projet, **PHEROSENSOR** participe à la création de nouveaux dispositifs d'épidémiomonitoring en développant des capteurs de nouvelle génération. Les perspectives du projet incluent notamment une mise en réseau susceptible de rendre compte, en temps réel :

- de la réalité biologique couverte par l'épidémiomonitoring ;
- de modèles élargis pour couvrir les trajectoires d'évolution des risques dans leur dimension dynamique temporelle et spatiale sur l'ensemble de la saison de culture et en tenant compte de la diversité des conditions environnementales ;
- de méthodes biostatistiques adaptées pour traiter la diversité des informations produites par les réseaux de capteurs, en les mettant en relation avec les données climatiques ou encore des modèles de croissance des cultures ;
- et enfin, des réseaux d'informations, permettant le déploiement de sites instrumentés, pour le partage des informations entre acteurs.

## Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Philippe Lucas (philippe.lucas@inrae.fr)
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/pherosensor>

# SPECIFICS - CONCEVOIR ET DÉVELOPPER DES SYSTÈMES DE CULTURE SANS PESTICIDES ET RICHES EN LÉGUMINEUSES À GRAINES

## ► Contexte

Utilisées pour diversifier les systèmes de culture, les légumineuses se trouvent à l'interface de deux transitions majeures : agroécologique et alimentaire. En effet, les légumineuses à graines sont riches en protéines sur le plan nutritif, et sont capables de capter l'azote de l'air via une symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote présentes dans les sols, ce qui leur vaut une place d'intérêt dans la rotation des cultures. Leur production permet de réduire l'utilisation d'engrais azotés, entraînant ainsi moins d'émissions de gaz à effet de serre. En revanche, ces cultures s'avèrent être très sensibles à différents bioagresseurs et leur conduite sans pesticides représente un challenge.

Il est donc nécessaire de changer de paradigme : ne plus considérer les légumineuses pour les services rendus à d'autres cultures, mais concevoir des systèmes performants pour produire des légumineuses sans pesticides.

C'est tout l'enjeu du projet **SPECIFICS** qui vise à acquérir de nouvelles connaissances pour aider à la conception et au développement de systèmes de culture sans pesticides et riches en légumineuses à graines. Les objectifs sont d'identifier et d'évaluer différents leviers facilitant la transition vers ces systèmes. Ces leviers incluent la recherche de nouvelles sources de résistance, une meilleure mobilisation de la diversité biologique dans le temps (rotation) et dans l'espace (cultures associées, infrastructures agroécologiques, ...), ainsi que la valorisation et la promotion de ces systèmes à l'échelle des filières.

## ► Stratégies déployées

Le projet réunit agronomes, généticiens, pathologistes, entomologistes, écologues, économistes et sociologues pour concevoir des variétés, des itinéraires techniques, des systèmes de culture, et des modes de valorisation et de conseil qui permettront d'atteindre les objectifs de durabilité agronomique et économique. Les essais s'appuient notamment sur des ressources génétiques de légumineuses, des plateformes expérimentales en agroécologie ainsi que sur un dispositif d'enquêtes et de traitement de données économiques. Le projet s'organise en quatre axes de travail allant de la plante au système agricole et alimentaire.



▲ **Organisation du projet SPECIFICS en 4 axes de travail allant de la plante au système agricole et alimentaire.**

© Judith Burstin, Stéphane Cordeau, Marie-Laure Pilet-Nayel, Guenaelle Hellou, Violaine Deytieux, Sandie Barbot, Myriam Tisserand.

► **Avancées**

**Caractéristiques végétales pour la lutte contre les bioagresseurs des légumineuses dans les systèmes de culture sans pesticides**

*Ou comment accroître la résistance des légumineuses à graines (pois, féverole, lentille) à divers ravageurs (sitones, bruches, pucerons) et maladies (Aphanomyces, ascochytose, oïdium) et leur compétitivité vis-à-vis des adventices ?*

1 **Caractérisation des légumineuses pour une meilleure utilisation des ressources génétiques disponibles**

Une première étape vise à faciliter une meilleure utilisation des ressources génétiques disponibles dans les collections de pois et de féverole hébergées par INRAE.

Une base de données, GRIN-Global, a été déployée pour les ressources génétiques dont dispose INRAE sur le pois et la féverole. Une importation des « données passeports » dans la

base de données a été réalisée, associée à la régénération des ressources génétiques pour disposer de graines viables pour toutes les accessions (échantillons présents dans la collection de pois). Les « données passeports » désignent un ensemble d'informations de base permettant d'identifier et de décrire une accession (nom scientifique, coordonnées géographiques, ...).

Par ailleurs, une caractérisation de sous-ensembles d'accessions représentant la diversité des collections est réalisée

pour des caractères de résistance ou de compétitivité vis-à-vis de bioagresseurs. Ces phénotypages sont réalisés par analyse automatisée d'images :

- 240 accessions de féveroles, phénotypées pour la résistance au puceron du pois et pour l'architecture racinaire, aérienne et des nodules ;

**GRIN-Global est un système conçu pour que les banques de gènes stockent et gèrent les informations associées aux ressources phytogénétiques et pour fournir ces informations à l'échelle mondiale.**

- 170 accessions de pois, phénotypées pour l'émergence après semis.

Afin de pouvoir simuler des systèmes de culture riches en légumineuses et qui favorisent la régulation des adventices par compétition pour les ressources, il a été nécessaire de développer un nouveau module dans le modèle FlorSys sur la compétition pour l'eau. Ce module identifie une diversité de réponses morphologiques des espèces cultivées et des adventices face au stress hydrique<sup>1</sup>.

## FOCUS

FlorSys est un modèle de type « parcelle virtuelle » qui simule l'effet des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice, et les conséquences pour la production des cultures et pour la biodiversité. Il simule les processus biophysiques déterminant le cycle de vie des adventices et cultures en fonction des traits (caractéristiques biologiques) des espèces et variétés, des opérations culturales et du pédoclimat. FlorSys permet ainsi d'évaluer des systèmes de culture existants et virtuels afin de concevoir des systèmes économes en herbicides, conciliant production agricole et biodiversité. Il peut aussi être utilisé pour identifier des idéotypes variétaux favorisant la régulation biologique des adventices. Le modèle est souvent utilisé conjointement avec des outils d'évaluation multicritère tel que DEXiPM pour évaluer la durabilité (économique, sociale, environnementale) des systèmes testés.

Désormais, le modèle FlorSys est en capacité de simuler des systèmes de culture en situation de stress hydrique, intégrant aussi la compétition pour l'eau (en plus de celle pour la lumière et l'azote). Cette amélioration permet d'explorer l'effet des systèmes dans un gradient pédoclimatique plus étendu et de mieux tenir compte des effets du changement climatique.

## 2 Production de matériel végétal innovant et des connaissances via des approches de génomique translationnelle

### • Création de matériel innovant

- Des lignées de pois mutantes, pour cinq gènes susceptibles de favoriser les maladies et connus chez des espèces non légumineuses, ont été obtenues et évaluées pour la résistance aux maladies.
- Des lignées de pois possédant des QTL de résistances aux pucerons, bruches, oïdium et/ou à *Aphanomyces euteiches* ont été produites par rétrocroisement et speed-breeding (permettant une croissance rapide en conditions contrôlées).

L'objectif de ce matériel innovant est de développer des variétés multirésistantes aux différents bioagresseurs des légumineuses.

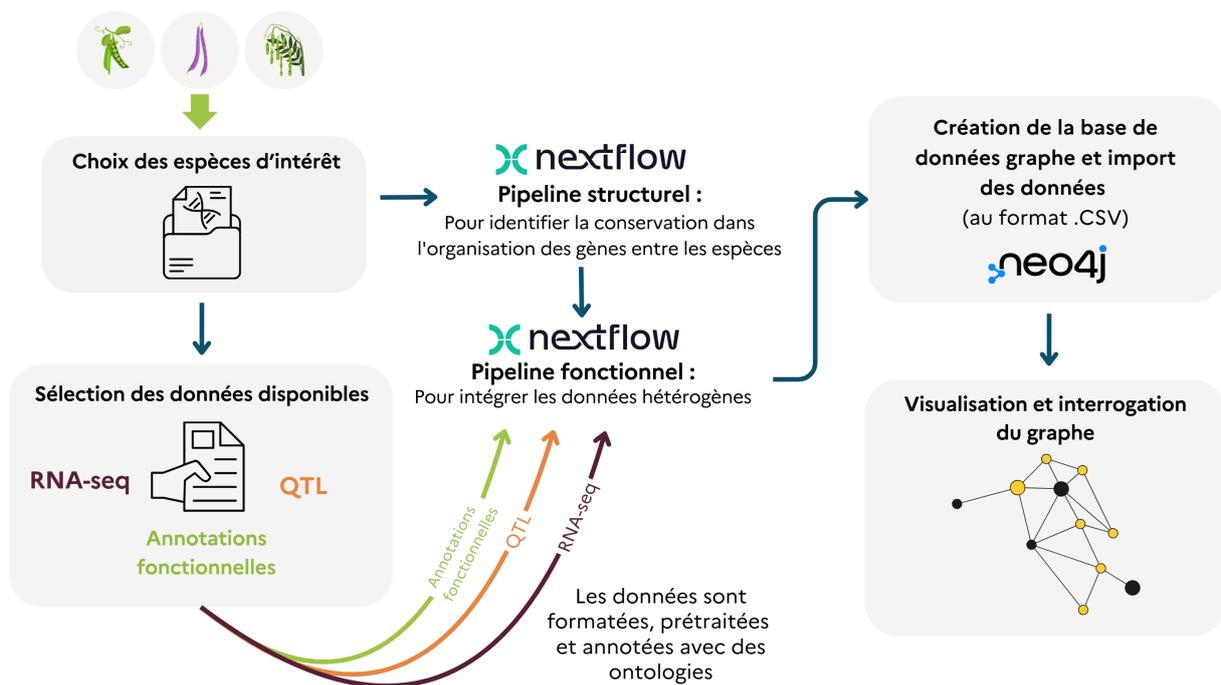
Un QTL (Quantitative Trait Locus) est une région spécifique du génome associée à une variation phénotypique quantitative, comme la taille ou le rendement, et qui influence ces traits complexes.

### • Développement d'une base de données de connaissances

Pour optimiser le transfert de connaissances entre espèces légumineuses, une base de données de type graphe, OrtholegKB, a été développée<sup>2</sup>. Elle intègre des données génétiques et RNA-Seq, en s'appuyant sur l'ontologie et sur un nouveau « pipeline » de positionnement des marqueurs sur les génomes. En bioinformatique, un « pipeline » désigne une série d'étapes automatisées, utilisées pour transformer et traiter des données (nettoyage des séquences, identification des mutations, ...).

<sup>1</sup> Colbach, 2016, « FLORSYS, outil d'analyse et de modélisation pour réduire l'utilisation des pesticides dans les divers systèmes de culture ».

<sup>2</sup> Imbert et al., 2023, « Development of a Knowledge Graph Framework to Ease and Empower Translational Approaches in Plant Research ».



▲ **Représentation simplifiée des « pipelines » utilisés pour construire OrthoLegKB, une base de données pour la recherche translationnelle.**

© Baptiste Imbert, Jonathan Kreplak, Nadim Tayeh, Myriam Tisserand.

### 3 Etude des mécanismes de résistance à *Aphanomyces euteiches*

Enfin, le projet étudie les mécanismes de résistance à *Aphanomyces* chez le pois. Une méta-analyse a été réalisée pour identifier les locus génétiques responsables de la résistance en analysant différentes sources génétiques de résistance chez le pois<sup>3</sup>. Cette étude a notamment

**Lignée quasi-isogénique : lignée qui ne diffère d'une lignée receveuse que pour une petite portion de génome contenant un caractère d'intérêt provenant d'une lignée donneuse.**

identifié par RNASeq des gènes différentiellement exprimés entre des lignées quasi-isogéniques de pois, résistantes et sensibles à un QTL majeur pour la résistance à *Aphanomyces euteiches*.

Par la suite, une analyse de la conservation de ces locus de résistance a été effectuée entre les génomes du pois, de la féverole et de la lentille. Cette comparaison génétique permet d'explorer les similitudes dans les mécanismes de résistance entre ces espèces, dans le but de développer

des stratégies de déploiement durable des locus de résistance. Ces stratégies seront appliquées aux rotations de cultures riches en légumineuses, afin de limiter les pertes dues aux maladies dans ces systèmes.

<sup>3</sup> Leprévost et al., 2023, « Advanced backcross QTL analysis and comparative mapping with RIL QTL studies and GWAS provide an overview of QTL and marker haplotype diversity for resistance to *Aphanomyces root rot* in pea (*Pisum sativum*) ».

## Intensification des régulations biologiques à différentes échelles spatiales et temporelles pour la lutte contre les bioagresseurs des légumineuses

*Ou comment organiser la biodiversité cultivée dans le temps (rotation, ...) et l'espace (culture associée, plante compagne, bandes fleuries, ...) pour maximiser les régulations biologiques des bioagresseurs des légumineuses ?*

### Evaluer l'impact de la diversification spatiale (culture associée) et des résistances variétales sur la dynamique des bioagresseurs des légumineuses

Pour tester la capacité de différents types de diversification spatiale (cultures associées avec des légumineuses) à réduire le niveau de bioagresseurs, différents essais sont menés. L'analyse des résultats, en cours, permet d'étudier l'impact des sources variétales de résistance sur l'évolution du pouvoir pathogène des populations d'Aphanomyces euteiches dans les successions culturales de légumineuses en interaction avec les microorganismes du sol. Un échantillonnage du sol, le test du potentiel d'inoculum du sol, l'extraction de l'ADN et le séquençage de celui-ci sont réalisés.

### Augmenter la diversité intra- et inter-spécifique pour réguler les bioagresseurs

Sur la plateforme expérimentale CA-SYS (Centre INRAE Bourgogne-Franche-Comté - Dijon), des suivis ont été réalisés sur les bioagresseurs, leurs auxiliaires responsables de leur régulation, et le niveau de régulation, ainsi que des suivis sur les cultures légumineuses dans le but de dresser une synthèse globale des données acquises sur le terrain.

De plus, un essai factoriel a été mis en place sur la plateforme CA-SYS dont les objectifs sont de :

1. Comprendre et hiérarchiser le rôle de différents degrés/leviers de diversification à l'échelle annuelle sur la régulation d'une communauté de bioagresseurs et sur des organismes auxiliaires ;
2. Caractériser l'effet suppressif de divers mélanges d'espèces sur la flore adventice.

### Les premiers résultats indiquent que :

- L'effet suppressif de l'association céréale-légumineuse est en moyenne aussi important que celui de la céréale cultivée en pur mais supérieur à celui de la légumineuse en pur.
- Il n'y a pas de différence observée entre des légumineuses associées et des légumineuses cultivées en pur.
- Plus la biomasse des cultures est importante, plus celle des folles avoines (adventices) est faible. Il en est de même pour le pourcentage de couverture précoce.



▲ Photographie de l'expérimentation réalisée sur la plateforme expérimentale CA-SYS (Bretenière, France) en 2024.

© Rodolphe Hugard, Guillaume Poussou.

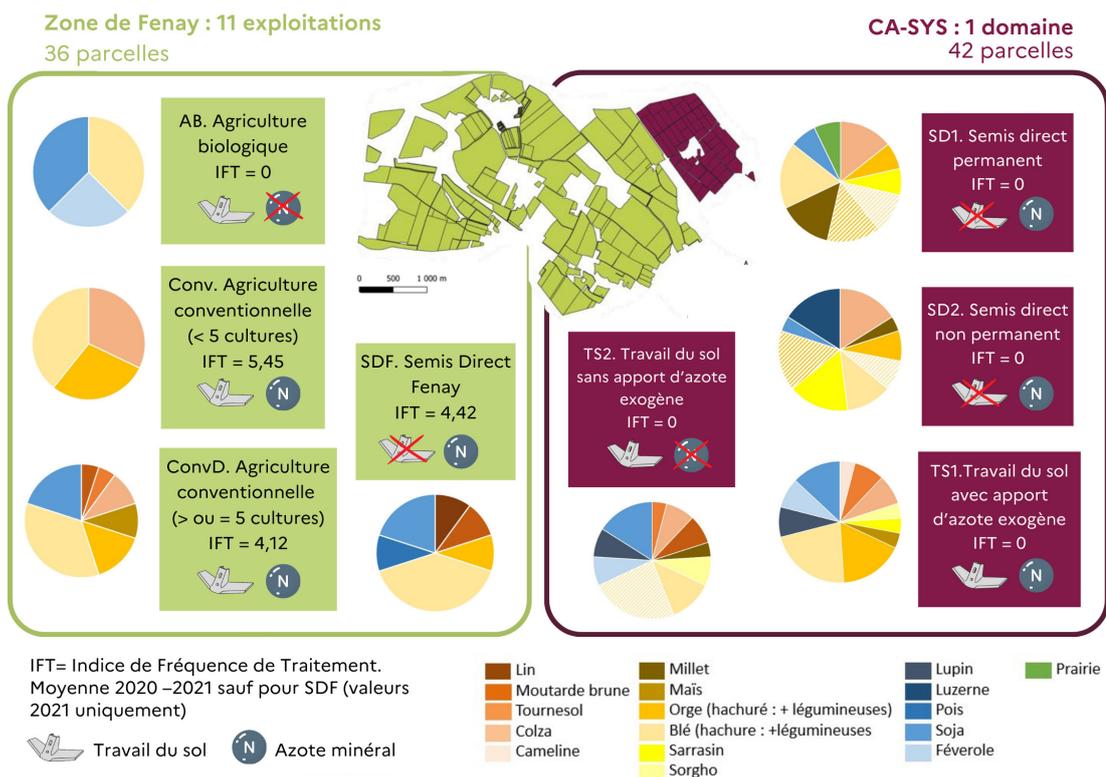
Cet essai est piloté par l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Agroécologie et l'Unité expérimentale INRAE du domaine d'Epoisses (U2E). On y retrouve 237 micro-parcelles incluant des modalités en association d'espèces, en mélanges variétaux et en culture pure, tous produits dans un contexte « zéro pesticide ».

## Performances des systèmes riches en légumineuses sans pesticides et conditions de leur développement : des systèmes de production aux marchés

Ou comment favoriser à d'autres échelles (exploitation, filière) le développement de ces systèmes innovants ?

### Diagnostic agronomique et comparaison technico-économique

Pour mieux évaluer ces systèmes de culture testés en expérimentation, une évaluation multicritère des systèmes étudiés est réalisée en comparaison à des systèmes locaux et dominants d'agriculteurs voisins. Cette étude s'appuie sur un calcul d'indicateurs de performance et sur une description fine des systèmes de culture de référence.



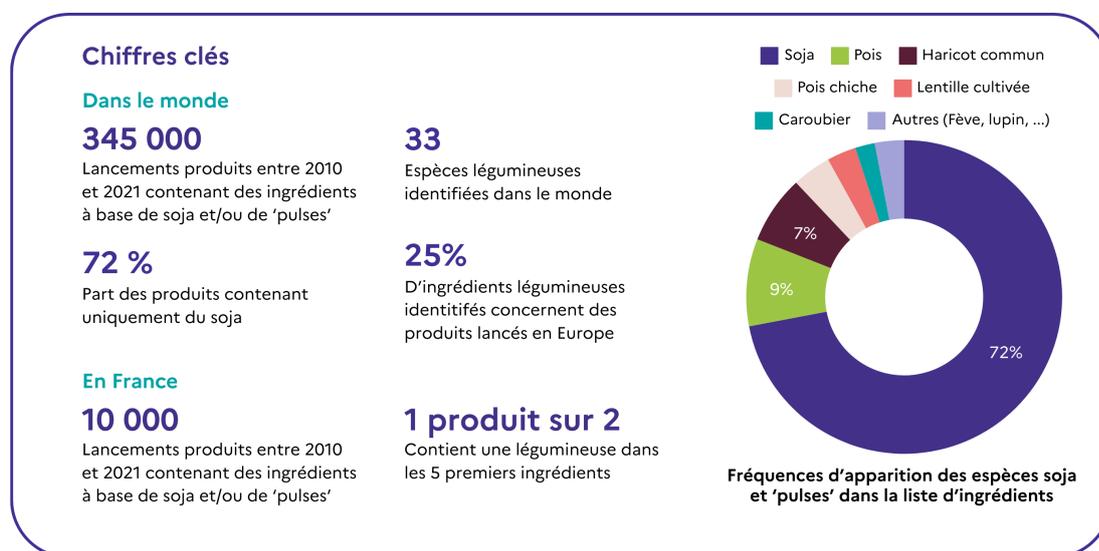
### ▲ Comparaison de systèmes de culture riches en légumineuses et sans pesticides mis en œuvre sur la plateforme expérimentale CA-SYS avec des systèmes de culture de référence mis en œuvre par les agriculteurs de la zone de Fenay.

© Maé Guinet, Violaine Deytieux, Stéphane Cordeau, Elise Caby, Camille Chartier, Sébastien Guyonvernier, Lucie Hasle, Isaac Kouadio, Karine Lamoureux, Marie Sabatier, Myriam Tisserand.

La plateforme CA-SYS comprend 125 hectares de parcelles conduites selon 4 systèmes de culture agroécologiques sans pesticides mobilisant la diversité végétale avec labour (TS1 et TS2) et sans labour (SD1 et SD2). L'objectif est d'évaluer les performances technico-économiques au regard de la zone de référence de Fenay comportant 10 exploitations agricoles gérées selon 4 stratégies différentes. Les résultats préliminaires (2019-2023) montrent que les systèmes sont équivalents en terme de temps de traction, sauf SD1 dont le temps est plus faible (semis-direct). En terme de balance azotée, tous les systèmes ont une balance positive (supérieure ou égale à 30kg N/ha) car les objectifs de rendement ne sont pas atteints, sauf en TS2 (avec une balance négative). Même si elles ne sont pas satisfaisantes, les meilleures marges semi-nettes sont comprises entre 150 et 300€/ha en TS1 et TS2, puis plus faibles en SD2. En revanche, le système SD1 est en impasse agronomique (sans récoltes les 3 dernières années).

## Quels développements durables des légumineuses dans les filières ?

Les choix de production des agriculteurs et des filières sont très dépendants des débouchés sur le marché. Afin de connaître la dynamique actuelle du développement des différentes légumineuses à graines dans l'agro-industrie, le projet a exploré la base de données MINTEL-GNPD qui recense dans plus de 80 pays les produits agroalimentaires sur le marché. Grâce à des méthodes de fouille de texte appliquées aux listes d'ingrédients et aux descriptifs des produits sur les emballages, le projet a pu identifier près de 345 000 lancements produits dans le monde entre 2010 et 2021, qui contiennent des ingrédients à base de soja et/ou d'autres légumineuses. Au total, plus de 30 espèces différentes de légumineuses ont été recensées. Parmi ces produits, 72% contiennent du soja ; et pour les autres produits, 4 espèces représentent près de 80% des ingrédients à base de légumineuses hors soja : le pois protéagineux, suivi du haricot commun, du pois chiche et de la lentille<sup>4</sup>.



### ▲ Analyse de la diversité d'espèces légumineuses utilisées par l'offre agro-industrielle.

© Marie-Benoît Magrini, Myriam Tisserand.

Avec « pulses », terme désignant les légumineuses récoltées pour leurs graines sèches, comme les lentilles, pois chiches ou haricots.

<sup>4</sup> Salord et al., 2024, « Crop Diversity Used in Branded Products with Focus on Legume Species Worldwide ».

### A retenir :

- C'est en Europe que la progression des légumineuses autres que le soja, et en premier le pois protéagineux, est la plus forte dans le renouvellement de l'offre alimentaire.
- Le soja est plus fréquemment utilisé que les autres légumineuses au niveau mondial, mais en Europe l'équilibre est plus marqué entre les nouveaux produits à base de soja et ceux à base d'autres légumineuses.
- Des légumineuses comme le pois chiche et la lentille connaissent une utilisation croissante.
- Le soja reste une espèce très polyvalente en alimentation, avec le plus grand nombre de types d'ingrédients aux fonctionnalités multiples.
- Les mentions valorisantes liées à l'environnement sont plus fréquentes dans les produits lancés en Europe que dans le reste du monde, même si ces mentions restent marginales relativement à l'ensemble des lancements produits.

Bien que les légumineuses autres que le soja progressent dans l'offre agro-industrielle, la diversité des légumineuses utilisées reste faible. De plus, très peu de produits mentionnent explicitement dans le descriptif produit la présence de légumineuses. La légumineuse reste peu attachée à une « identité alimentaire » comme peut l'être le blé ou des ingrédients de source animale. Le développement des sciences alimentaires, et la communication auprès du consommateur sur les autres légumineuses, restent essentiels pour valoriser le potentiel d'une plus grande diversité de légumineuses.

Enfin, pour consolider ces usages des légumineuses dans les filières agro-industrielles et dans les assolements, la contractualisation est une solution pour sécuriser les investissements des parties et les engager dans une co-construction de pratiques agricoles durables. Le projet **SPECIFICS** a analysé les modalités contractuelles qui peuvent aider à structurer de telles démarches de filières. Cette analyse invite à poursuivre la réflexion sur les complémentarités entre ces contrats privés passés entre maillons des filières, et des contrats publics initiés par des collectivités (ex. Contrat Agriculture Durable) pour consolider les effets incitatifs d'engagement dans des pratiques vertueuses. En effet, ces pratiques peuvent générer des surcoûts ou des pertes de revenu chez les agriculteurs, tout particulièrement en phase d'apprentissage. Un travail d'investigation approfondie sur plusieurs filières de légumineuses est en cours pour évaluer la capacité des filières à s'engager collectivement, de la production à la transformation des graines, dans la construction d'un apprentissage collectif visant la réduction d'usage des pesticides, sécurisé par des contrats adaptés<sup>5</sup>.

## ► Perspectives

Les légumineuses sont un pilier d'écologisation des systèmes agricoles face aux enjeux du changement climatique, en contribuant à réduire à la fois l'usage des engrais et la consommation de protéines animales. La diversité des légumineuses produites est essentielle pour permettre de concevoir des rotations adaptées aux conditions pédoclimatiques dans un contexte sans pesticides. Cette diversité suppose aussi une capacité des filières à les valoriser sur le marché auprès des consommateurs, marché qui est en phase de croissance. Trouver des solutions durables de production est essentiel pour engager le plus rapidement les acteurs dans un apprentissage collectif de bonnes pratiques de production.

<sup>5</sup> Magrini et al., 2023, « Quelle singularité des contrats sur la production, en France, dans un contexte de transition des filières agricoles ? »

## ► Références

- Nathalie Colbach. « FLORSYS, outil d'analyse et de modélisation pour réduire l'utilisation des pesticides dans les divers systèmes de culture » (2016). <https://hal.science/hal-01605808>.
- Baptiste Imbert, Jonathan Kreplak, Raphaël-Gauthier Flores, Grégoire Aubert, Judith Burstin, et Nadim Tayeh. « Development of a Knowledge Graph Framework to Ease and Empower Translational Approaches in Plant Research: A Use-Case on Grain Legumes ». *Frontiers in Artificial Intelligence* 6 (2023). <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1191122>.
- Théo Leprévost, Gilles Boutet, Angélique Lesné, Jean-Philippe Rivière, Pierrick Vetel, Isabelle Glory, Henri Miteul, et al. « Advanced backcross QTL analysis and comparative mapping with RIL QTL studies and GWAS provide an overview of QTL and marker haplotype diversity for resistance to *Aphanomyces* root rot in pea (*Pisum sativum*) ». *Frontiers in Plant Science* 14 (2023). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1189289>.
- Marie-Benoît Magrini, Lucas Bettoni, Melise Bouroullec-Machado, Célia Cholez, Marie Dervillé, Didier Krajeski, et Geneviève Nguyen. « Quelle singularité des contrats sur la production, en France, dans un contexte de transition des filières agricoles ? » *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, no 385 (2023). <https://doi.org/10.4000/economierurale.11830>.
- Tristan Salord, Marie-Benoît Magrini, Valérie Lullien-Pellerin, Guillaume Cabanac, Marie-Joseph Amiot, Cécile Barron, Adeline Boire, Valérie Micard, et Magalie Weber. « Crop Diversity Used in Branded Products with Focus on Legume Species Worldwide ». *Npj Science of Food* 8, no 1 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00305-7>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : Stéphane Cordeau ([stephane.cordeau@inrae.fr](mailto:stephane.cordeau@inrae.fr)) et Judith Burstin ([judith.burstin@inrae.fr](mailto:judith.burstin@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/specifics>
- Autres ressources : <https://www.linkedin.com/company/specifics-ppr/>



# SUCSEED - METTRE FIN À L'UTILISATION DES PESTICIDES SUR LES SEMENCES ET PROPOSER DES SOLUTIONS ALTERNATIVES

## ► Contexte

Les semences constituent le point de départ de la chaîne alimentaire et déterminent la santé et le rendement des cultures. La qualité, la diversité et la robustesse des semences permettent aux plantes cultivées de s'adapter aux aléas climatiques et aux pressions biotiques, de prévenir l'émergence de maladies et de favoriser une croissance et un maintien de la production, renforçant ainsi la résilience des systèmes agricoles. Une protection durable des semences est essentielle pour contribuer non seulement à la sécurité alimentaire mais également à la préservation des écosystèmes, soutenant ainsi un équilibre crucial pour l'agriculture de demain.

Le projet **SUCSEED** repose donc sur la nécessité de développer des solutions innovantes à la protection des semences via des approches naturelles, efficaces et éco-responsables. Le projet vise à faire de la semence un acteur central de la gestion de la santé des plantes en se concentrant sur deux problèmes phytosanitaires majeurs : les pathogènes transmis à et par les semences et les manques à la levée.

## ► Stratégies déployées

Le projet **SUCSEED** explore 3 leviers d'action :

**1 L'induction des voies immunitaires des semences**, en activant des voies de défense en amont des attaques d'agents pathogènes.

Semblable à la vaccination, cette approche vise à activer les mécanismes de défense des semences avant l'exposition aux agents pathogènes. L'objectif est de comprendre les mécanismes moléculaires impliqués dans l'immunité des graines et d'identifier des éliciteurs pour stimuler leurs défenses. En parallèle, le projet étudie les facteurs de transmission des agents pathogènes aux semences pour bloquer leur entrée et éviter leur propagation.

**2 Le pilotage du microbiote associé aux semences**, pour identifier les membres du microbiote qui permettent d'améliorer la cinétique de germination et de levée en l'absence et présence d'agents pathogènes.

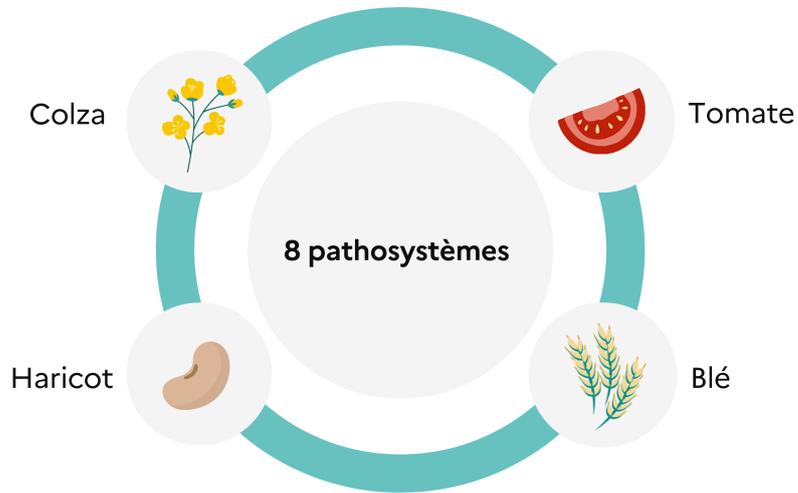
Le projet explore comment introduire des micro-organismes bénéfiques pour la croissance et la santé des plantes en utilisant des communautés microbiennes synthétiques.

**3 La modulation du microenvironnement des graines** en mobilisant la diversité des molécules émises lors de la germination pour leur rôle dans la protection et la vigueur des graines.

Cette troisième démarche consiste à étudier et à modifier les exsudats sécrétés par les graines, qui peuvent affecter la composition du microbiote. Le projet vise à identifier et à caractériser ces exsudats pour améliorer la protection et la vigueur des graines et des plantules.

Le projet travaille sur 4 espèces de culture : le blé, la tomate, le haricot et le colza, ainsi que leurs agents pathogènes respectifs. 8 pathosystèmes sont ainsi étudiés, avec 4 pathosys-

tèmes ciblés pour les étapes de transmission à et par la semence, et 4 autres pathosystèmes pour les fontes de semis. Des tests de pouvoir pathogène ont été mis au point pour obtenir des données quantitatives sur la sensibilité à différents pathogènes.



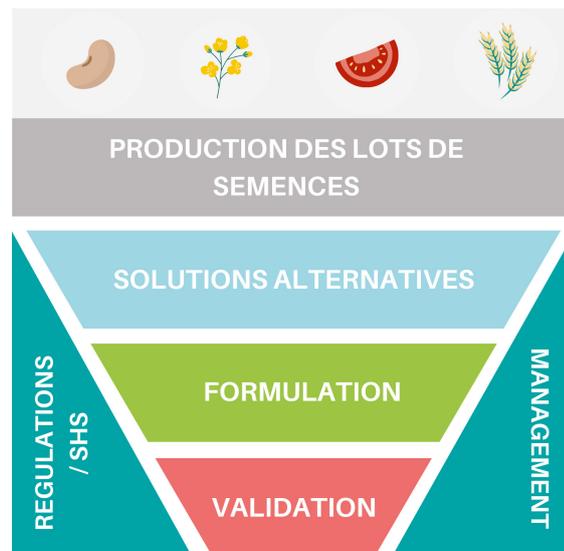
**▲ Pathosystèmes d'étude du projet SUCSEED.**

© Matthieu Barret, Myriam Tisserand.

**Avec *Fusarium* et *Microdochium* pour le blé ; *Alternaria* et *Rhizoctonia* pour le colza ; *Xanthomonas* et *Pythium* pour le haricot ; *Clavibacter* et *Pythium* pour la tomate.**

La production de semences est réalisée pour 8 géotypes par espèce ciblée (> 10 000 graines par lot). Deux conditions de production par espèce sont mises en place (serre et plein champ) et sont déployées sur le territoire étudié (Maine-et-Loire et Gers).

Les solutions novatrices issues des trois leviers d'action pourront ensuite être formulées avec des technologies adaptées aux semences et testées pour valider leur efficacité et leur potentiel commercial. Ces développements sont soutenus dans le projet par des recherches réglementaires, économiques et sociales pour anticiper les besoins et les obstacles, et assurer l'acceptabilité par les acteurs de l'industrie semencière ainsi que par la société et les politiques.



**▲ Organisation du projet SUCSEED.**

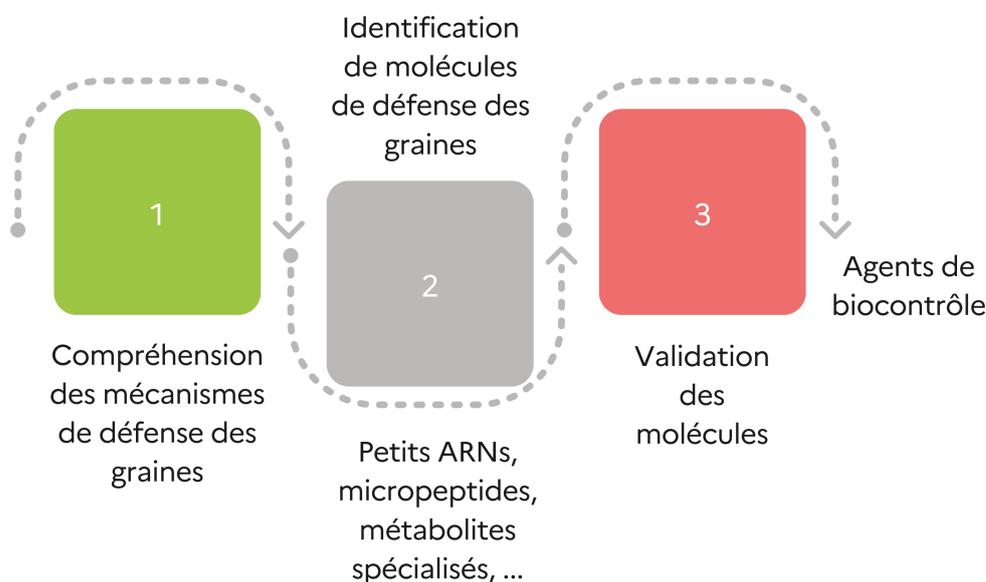
© Matthieu Barret, Myriam Tisserand.

## Avancées

### L'induction des voies immunitaires des semences

*Ou mieux comprendre les mécanismes pour identifier les molécules impliquées dans la défense des graines et les utiliser pour booster leurs défenses*

La graine est un organe caractéristique de la reproduction sexuée, sous influence de la plante-mère qui va transférer une part de son immunité. L'immunité va être transmise au travers de l'état physiologique et immunitaire de la plante mère. Actuellement, peu de connaissances sur les mécanismes de défense de la graine sont disponibles. Le projet **SUCSEED** permet d'explorer les mécanismes qui contribuent à la défense face aux pathogènes des approches cellulaires et moléculaires, de façon multi-échelle et multi-omique.



#### ▲ Etapes suivies.

© Matthieu Barret, Myriam Tisserand

### Évaluation de l'activation des gènes de défense chez le colza et la tomate après traitement avec des stimulateurs de défense des plantes

Les plantes porte-graines des 4 espèces végétales du projet ont été traitées avec 5 stimulateurs de défense des plantes (SDP). Des analyses transcriptomiques ont mis en évidence l'activation de gènes de défense chez les graines de colza et de tomate. L'effet des SDP sur l'activation des voies de défense du haricot et du blé est modéré voire inexistant. En conséquence, les travaux de recherche subséquents se sont focalisés sur tomate et colza.

Les stimulateurs de défense des plantes (SDP) sont définis comme toute substance, tout extrait d'organismes divers, ou tout micro-organisme vivant non pathogène capable de promouvoir chez la plante un état de résistance face à des stress biotiques.

Au total :

**72** peptides,

**10** miARN,

et **7** métabolites impliqués dans les défenses et identifiés

**3** peptides avec des activités antimicrobiennes testés et validés chez la tomate

## Dialogue moléculaire entre la graine et les agents pathogènes lors de leurs transmissions

Une approche de « dual transcriptome » a été mise en œuvre pour explorer les interactions entre deux pathosystèmes : *A. brassicicola*, un champignon pathogène du colza, et *X. citri* pv. *fuscans*, une bactérie pathogène du haricot. Il est ainsi possible d'analyser les profils d'expression génétique des deux organismes, ce qui permet de mieux cerner les mécanismes de défense et les voies de signalisation impliquées. Parallèlement, les

déterminants moléculaires impliqués dans la résistance ou la sensibilité sont étudiés chez *X. citri* pv. *fuscans* à l'aide d'approches de génétique inverse. Cette démarche fournit une vue d'ensemble complète des réponses transcriptionnelles des deux organismes, permettant de comprendre les dynamiques d'interaction pathogène-hôte et d'identifier des cibles potentielles pour des interventions ou des améliorations génétiques.

## Activité antimicrobienne des exsudats de graines en dormance chez la tomate : Influence du génotype et validation des molécules impliquées

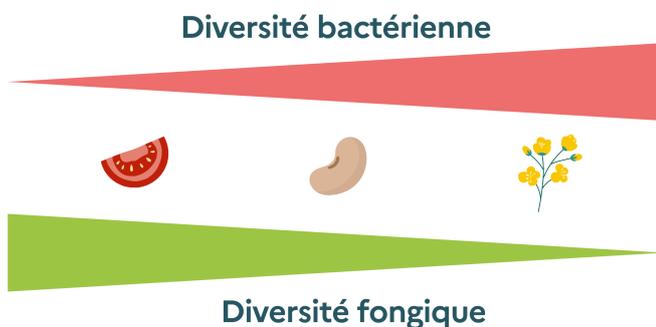
Chez la tomate, les exsudats de graines dormantes étudiées montrent une activité antimicrobienne qui dépend du génotype. Les molécules impliquées dans ces effets se situent dans l'endosperme (tissu nutritif qui entoure et nourrit l'embryon d'une graine). La validation des activités antimicrobiennes est en cours de réalisation via une méthode récemment développée dans le cadre du projet.

## Le pilotage du microbiote associé aux semences

*Ou limiter la transmission d'agents phytopathogènes et l'impact de la fonte des semis par le pilotage du microbiote des graines.*

## Caractérisation du microbiote bactérien et fongique des graines des 4 espèces

La diversité bactérienne et fongique associée aux lots de semences a été estimée. Un total de 2510 souches bactériennes et 1064 souches fongiques a été isolé de l'ensemble des lots de graines du projet (n=190 échantillons). Cette collection représente environ 70% de la diversité microbienne observée.



▲ Gradient de diversité.

© Matthieu Barret, Myriam Tisserand.

Variance R <sup>2</sup>	Bactéries			Champignons		
	Colza	Haricot	Tomate	Colza	Haricot	Tomate
Génotype	15%	18%	36%	22%	19%	29%
Production	14%	3%	15%	28%	36%	8%
GxP	16%	18%	42%	27%	25%	26%

**▲ Importance relative du génotype de l'hôte et de la zone de production dans la composition du microbiote des graines.**

© Marie Simonin, Myriam Tisserand, d'après les travaux en cours de l'équipe EmerSys (UMR IRHS).

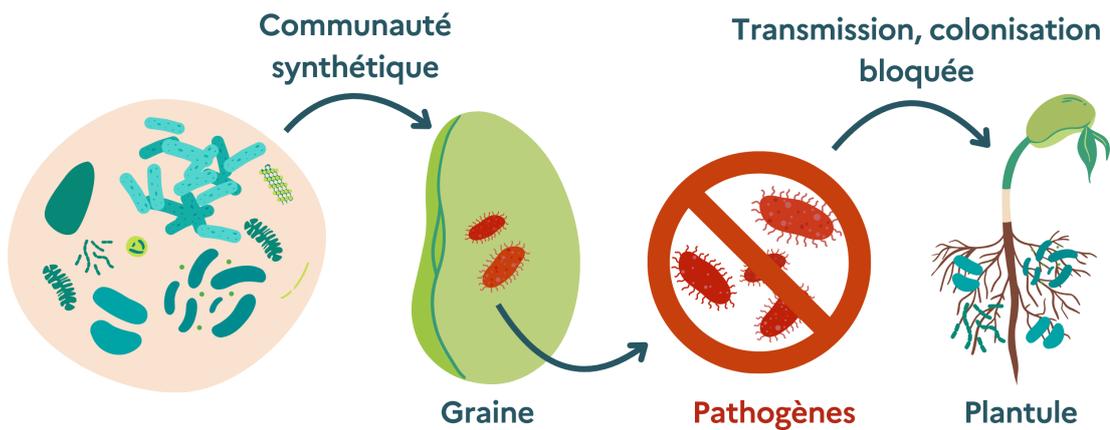
Le pourcentage de variance expliquée par chacun de ces deux facteurs, ainsi que par l'interaction entre ces deux facteurs (GxP), est indiqué dans le tableau.

Ces résultats montrent une réponse différente des deux facteurs (génotype de l'hôte et zone de production) en fonction des types de microorganismes (bactéries ou champignons) et des espèces végétales testées (colza, haricot ou tomate). Le génotype a une influence significative dans la variation observée, particulièrement pour la tomate en ce qui concerne les bactéries. La zone de production joue un rôle plus important pour les champignons, en particulier sur le colza et le haricot, mais son impact est plus limité pour les bactéries, notamment chez le haricot. Enfin, l'interaction entre le génotype et la zone de production semble forte pour les bactéries dans le cas de la tomate, ce qui pourrait indiquer une forte dépendance des réponses microbiennes à cette combinaison dans ce système.

### Inoculation de communautés synthétiques (SynCom) sur graines

Une centaine de séquences génomiques de la collection a été obtenue. Le protocole de reconstruction de communautés synthétiques (SynCom) bactériennes a été mis au point sur graines de haricot. Dans nos conditions expérimentales, les membres des SynCom représentent 80% du microbiote des plantules ce qui valide leur bonne transmission. Cinq SynCom avec des effets positifs sur le pourcentage de levée ont été mis en évidence. Les mécanismes moléculaires impliqués dans ces phénotypes sont en cours d'analyse. Des protocoles de reconstruction de SynCom mixte (bactérie-champignon) sont en cours de déploiement sur colza.





▲ **Processus d'obtention et d'utilisation des SynCom dans le projet SUCSEED.**

© Matthieu Barret, Myriam Tisserand.

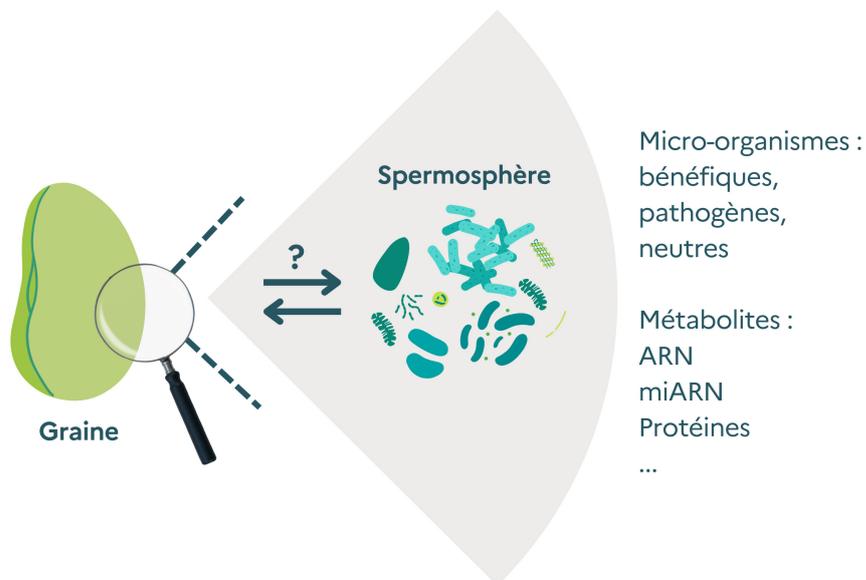
## La modulation du microenvironnement des graines

*Ou mieux comprendre et améliorer le microenvironnement de la graine*

La composition des exsudats de graines en germination est analysée en utilisant des approches multi-échelles (métabolomique, protéomique, transcriptomique et metabarcoding) pour décrire la diversité moléculaire.

Au total 72 peptides, 10 miARN et 7 métabolites impliqués dans les défenses ont été identifiés. 3 peptides avec des activités antimicrobiennes ont été validés chez la tomate. Les autres molécules sont en cours de criblage.

Des analyses de corrélations entre structure du microbiote et exsudats produits par les graines de colza et haricot ont été réalisées. Certains composés semblent moduler de manière significative l'abondance de certains taxons bactériens.



▲ **Représentation schématique du microenvironnement de la graine.**

© Matthieu Barret, Myriam Tisserand.

## ► Perspectives

Avec ces premiers résultats, le projet **SUCSEED** peut déjà avancer plusieurs constats et formuler des perspectives :

- Un effet très fort du génotype dans la réponse aux SDP se manifeste. Cela ouvre des perspectives pour de nouveaux programmes de sélection.
- Des mécanismes de réponse de défense inductibles, caractéristiques de la graine et spécifiques aux stades de développement et de germination, sont observés.
- Les métabolites spécialisés, les petits ARN et les peptides/micropeptides semblent être des mécanismes de défense prometteurs pour développer de nouvelles approches de protection et/ou de stimulation des semences, mais il existe un enjeu de formulation et de réglementation.
- Des tests d'enrobage ont été réalisés sur les graines de tomate et haricot à l'aide de solutions polymériques, d'émulsion, et de nanocapsules lipidiques. La stabilité de ces formulations a été caractérisée.

Parallèlement, des travaux importants sont en cours pour évaluer les aspects réglementaires et économiques de ces innovations. La préparation d'un article sur le cadre réglementaire et la première revue de littérature sur l'acceptabilité des innovations posent les bases pour une intégration réussie des nouvelles technologies. Sur le plan économique, une revue de littérature sur les modèles organisationnels et les écosystèmes d'innovation a été réalisée.

Ces efforts combinés visent à renforcer l'efficacité et l'acceptabilité des solutions proposées, tout en anticipant les défis réglementaires et économiques associés à l'innovation dans le secteur des semences.

## ► Références

- Arnault Gontran, Coralie Marais, Anne Préveaux, Martial Briand, Anne-Sophie Poisson, Alain Sarniguet, Matthieu Barret, et Marie Simonin. « Seedling microbiota engineering using bacterial synthetic community inoculation on seeds ». *FEMS Microbiology Ecology* 100, no 4 (2024). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae027>.
- Armelle Darrasse, Łukasz Paweł Tarkowski, Martial Briand, David Lalanne, Nicolas W. G. Chen, Matthieu Barret, et Jerome Verdier. « A Stage-Dependent Seed Defense Response to Explain Efficient Seed Transmission of *Xanthomonas Citri* Pv. *Fuscans* to Common Bean ». *Plant, Cell & Environment* n/a, no n/a (2024). <https://doi.org/10.1111/pce.15037>.
- Benjamin Hubert, Muriel Marchi, Joseph Ly Vu, Camille Tranchant, Łukasz P. Tarkowski, Olivier Leprince, et Julia Buitink. « A method to determine antifungal activity in seed exudates by nephelometry ». *Plant Methods* 20, no 1 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01144-z>.

## ► Contact

### Coordination

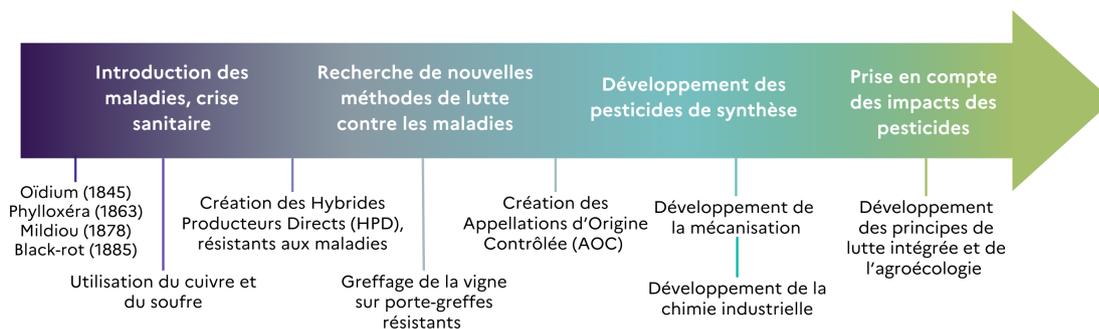
- Coordination du projet : Matthieu Barret ([matthieu.barret@inrae.fr](mailto:matthieu.barret@inrae.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/sucseed>



# VITAE – CULTIVER LA VIGNE SANS PESTICIDES : VERS DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES VITICOLES AGROÉCOLOGIQUES

## Contexte

Au 19<sup>ème</sup> siècle, plusieurs parasites originaires d'Amérique du Nord furent introduits accidentellement dans les vignobles européens, causant des dégâts considérables (phylloxera, mildiou, oïdium, black-rot). Savants et viticulteurs de tous horizons se sont mobilisés pour tenter d'endiguer la progression de ces nouveaux parasites. Cette période, riche en innovations, débouchera sur la découverte de nouveaux traitements comme l'emploi du soufre (oïdium) et du sulfate de cuivre (mildiou). Les chercheurs de l'époque développèrent également le greffage des cépages européens sur des porte-greffes américains résistants (phylloxera). Dans les années 1960-70, l'arrivée des pesticides de synthèse permit de diversifier et de sécuriser les moyens de protection.



### ▲ Évolution des stratégies de lutte contre les maladies du vignoble.

© François Delmotte, Léa Cabrol-Froget, Myriam Tisserand.

Aujourd'hui, la situation appelle à une transition centrée sur le développement de solutions alternatives aux pesticides. L'efficacité partielle des méthodes de lutte alternatives exige que celles-ci soient intégrées dans de nouvelles stratégies de protection qui maximisent leurs effets combinés.

Le projet **VITAE** s'inscrit dans cette dynamique, tout en questionnant les transformations socio-économiques nécessaires pour accompagner cette rupture agroécologique.

## Stratégies déployées

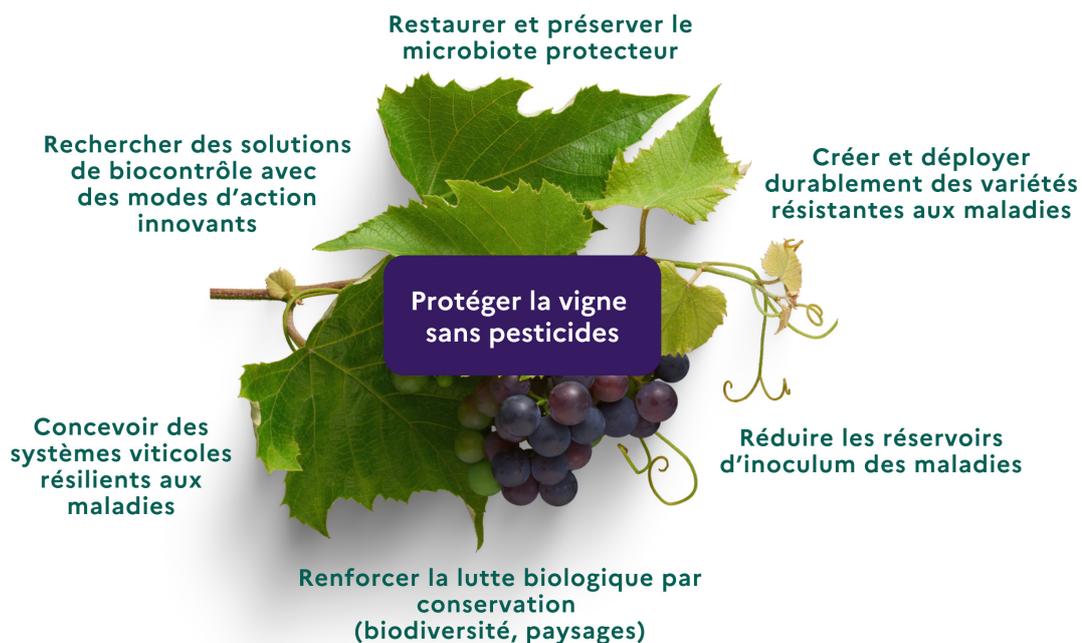
La France est actuellement engagée dans la réduction de l'usage des pesticides. Néanmoins, cette réduction, observée dans le réseau des exploitations DEPHY, semble atteindre un plafond pour la viticulture<sup>1</sup>. Actuellement, l'utilisation des pesticides au sein de la filière viticole présente plusieurs particularités :

- Un usage important sur une surface relativement réduite (concentration), avec un Indicateur de Fréquence de Traitements (IFT) phytosanitaires moyen de 15 ;

1 Nefti et al., 2024 « To What Extent Can a Phase-out of Pesticides in Viticulture Be Achieved? »

- La prédominance de fongicides pour lutter contre l'oïdium et le mildiou (plus de 80% du total des traitements) ;
- L'utilisation d'insecticides qui s'explique par les traitements obligatoires contre la cicadelle vectrice de la flavescence dorée (73% de la surface viticole française).

Dans ce contexte, le projet **VITAE** cible tout particulièrement la recherche d'alternatives pour lutter contre l'oïdium, le mildiou et la flavescence dorée.

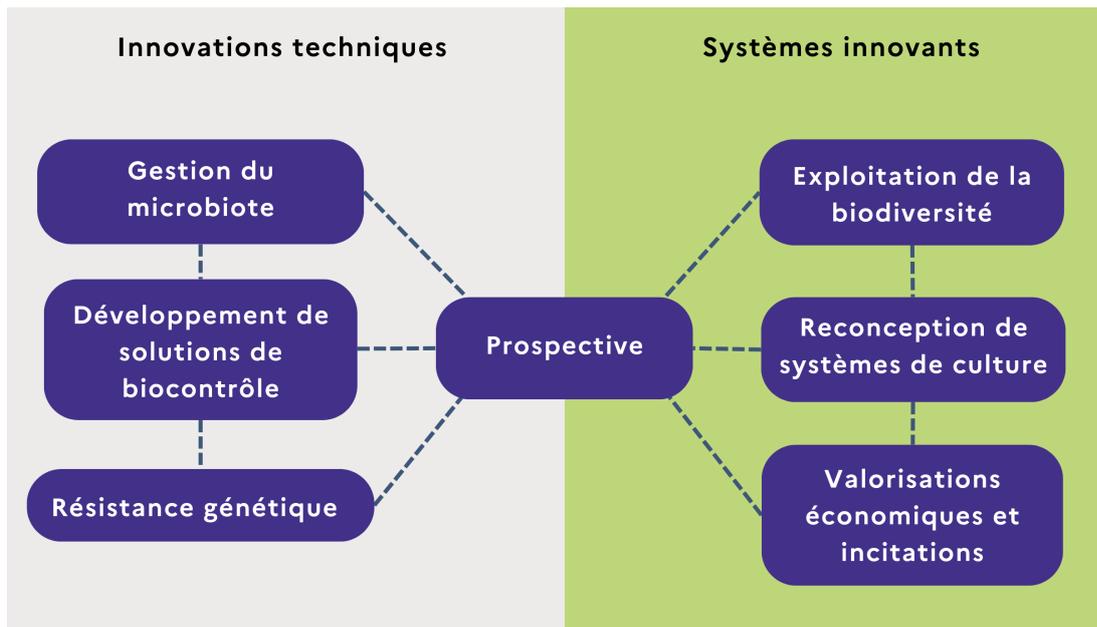


#### ▲ Approche agroécologique et leviers alternatifs étudiés par le projet VITAE.

© François Delmotte, Marielle Adrian, Corinne Vacher, Léa Cabrol-Froget, Myriam Tisserand.

Le projet **VITAE** est composé d'équipes de recherche françaises qui travaillent sur la protection agroécologique du vignoble et intègrent l'évaluation de la chaîne de valeur de la vigne au vin. Par une approche interdisciplinaire, le projet propose des recherches intégratives pour passer d'une démarche curative à une démarche agroécologique basée sur la prévention et la résistance des agrosystèmes.

Au-delà des travaux sur les leviers techniques, **VITAE** souhaite produire des connaissances pour l'accompagnement de la transition dans les aspects techniques et socio-économiques, et créer des outils pour éclairer les politiques publiques et accompagner les viticulteurs. Enfin, les chercheurs de **VITAE** conduisent une étude prospective pour élaborer des scénarios de sortie des pesticides en viticulture.



▲ **Organisation du projet VITAE.**

© François Delmotte, Marielle Adrian, Hervé Hannin, Myriam Tisserand.

## ► Avancées

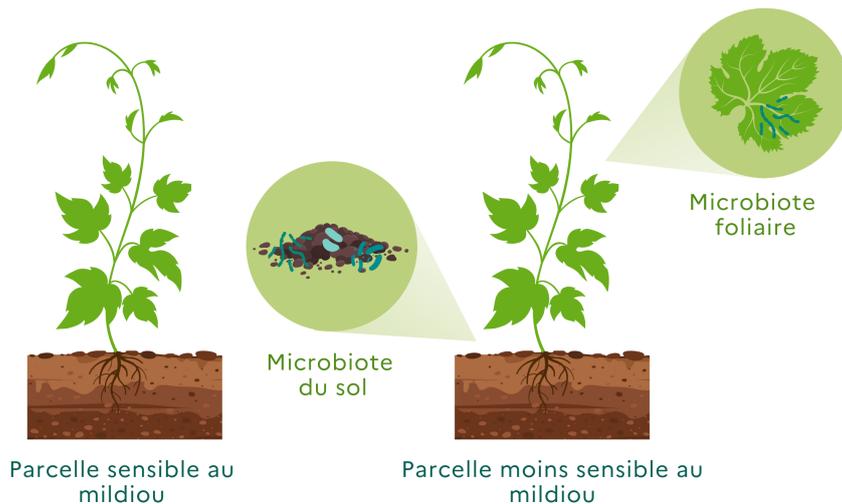
### Identifier des consortiums microbiens qui interfèrent avec les agents pathogènes de la vigne

En comparant les microbiotes de parcelles faiblement ou fortement impactées par le mildiou, plusieurs espèces de champignons et de bactéries se sont révélées être plus abondantes dans les parcelles faiblement sensibles à la maladie. Ces espèces d'intérêt se retrouvent en grandes quantités dans le sol superficiel au printemps, elles sont également présentes à la surface des jeunes feuilles mais rarement à l'intérieur des tissus foliaires.

Les micro-organismes foliaires des parcelles les moins sensibles au mildiou ont été isolés et mis en culture pour évaluer leur effet sur le développement du mildiou.

Une communauté microbienne simplifiée (« SynCom ») composée d'un mélange de 42 espèces de bactéries et champignons a montré un effet important sur la maladie dans des conditions de laboratoire. Ces micro-organismes d'intérêt sont de potentiels nouveaux produits de biocontrôle<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Fournier et al., 2022, « The Functional Microbiome of Grapevine throughout Plant Evolutionary History and Life-time ».



▲ **Analyse comparée de la sensibilité des parcelles face au mildiou.**

© Corinne Vacher, Myriam Tisserand, d'après la thèse de Paola Fournier.

## Développer de nouvelles options de biocontrôle originales par leur cible (black-rot) et/ou leur mode d'action

Identification de nouveaux produits de biocontrôle

FOCUS

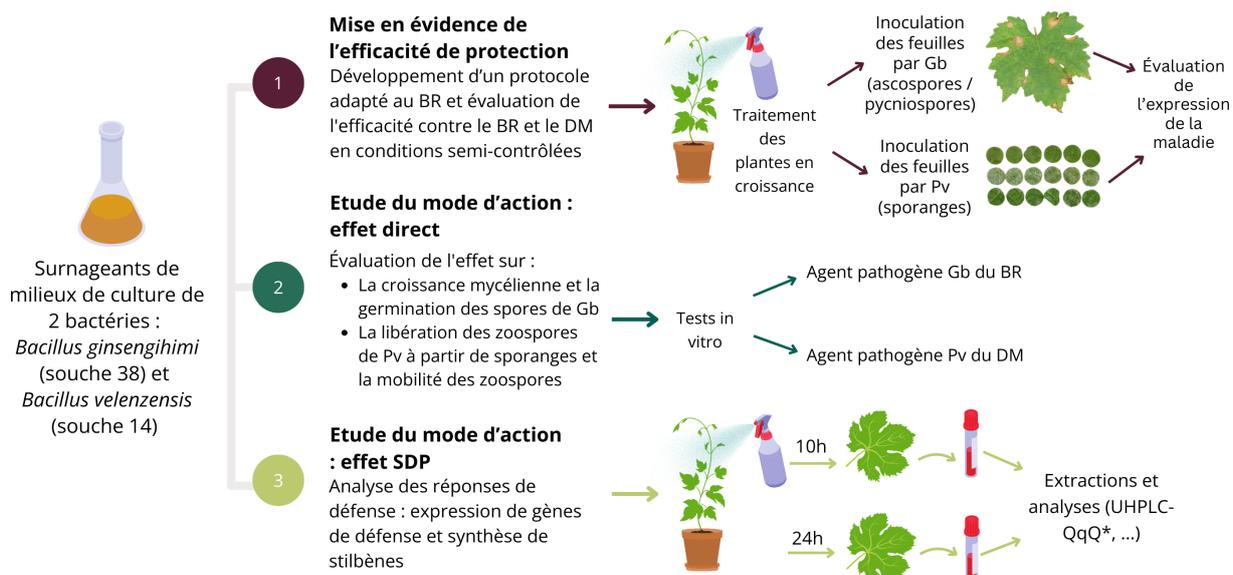
Le mildiou (DM) est causé par l'oomycète biotrophe *Plasmopara viticola* (Pv), le black-rot (BR) et le champignon hémibiotrophe *Guignardia bidwellii* (Gb) ; la pourriture grise est causée par le champignon nécrotrophe *Botrytis cinerea* (Bc).

Le développement de produits de biocontrôle efficaces contre le black-rot et le mildiou est attendu pour pallier à la suppression des fongicides. Deux souches bactériennes préalablement démontrées actives contre la pourriture grise ont été étudiées : *Bacillus velezensis* (Buz14) et *Bacillus ginsengihumi* (S38). Un test permettant l'évaluation de produits contre le black-rot, sur feuilles et en conditions semi-contrôlées, a d'abord été mis au point afin de compléter celui déjà disponible pour le mildiou. Ces tests ont ensuite permis de démontrer (1) l'efficacité des surnageants des milieux de culture des deux bactéries à protéger la vigne contre les deux maladies et (2) leur mode d'action par antibiose et stimulation des défenses de la plante (SDP). Ces deux nouveaux produits de biocontrôle ont donc l'intérêt d'être polyvalents et de combiner plusieurs modes d'action<sup>3</sup>.



© Bertrand Nicolas

<sup>3</sup> Raveau et al., 2024, « Broad-Spectrum Efficacy and Modes of Action of Two Bacillus Strains against Grapevine Black Rot and Downy Mildew ».



### ▲ Etude de produits de biocontrôle : méthodologie.

© Marielle Adrian, Robin Raveau, Myriam Tisserand.

\* La méthode UHPLC-QqQ est une analyse ultra-sensible pour détecter et quantifier des molécules spécifiques dans un échantillon.

Les produits de biocontrôle de type SDP ont une efficacité variable, voire insuffisante, lorsqu'ils sont utilisés au vignoble. Il est donc nécessaire d'identifier des stratégies permettant de pallier à ces difficultés et ainsi de sécuriser leur utilisation.

### Potentialisation de l'efficacité de SDP par une désinhibition préalable des défenses

Chez les plantes, les réponses immunitaires sont régulées négativement par des histones désacétylases de type 2 qui jouent un rôle clé dans la régulation de l'expression de certains gènes. L'inhibition de ces enzymes par des composés « désinhibiteurs de défenses des plantes » (DDP) permet de lever cette régulation négative. Le projet **VITAE** a montré que l'application d'un DDP préalable à celle d'un SDP induit une activation plus intense et plus durable de certains gènes de défense tels que ceux impliqués dans la synthèse des phytoalexines, ainsi qu'une protection supérieure contre le mildiou et l'oïdium, comparé à la seule application d'un SDP. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation des SDP.



### ▲ Principe de la stratégie de protection combinant désinhibition (DDP) puis stimulation (SDP) des défenses de la plante.

© Marielle Adrian, Stéphane Bourque, Myriam Tisserand.

## Vers un déploiement durable des variétés résistantes

Différentes variétés de vigne résistantes à l'oïdium et au mildiou sont aujourd'hui disponibles pour les viticulteurs. Le déploiement de ces variétés peut conduire à des phénomènes d'adaptation des populations d'agents pathogènes qui cherchent à « contourner » la résistance de la plante. **VITAE** s'intéresse à la gestion durable des résistances pour favoriser une efficacité sur le long terme de ces variétés. Le projet a permis d'identifier une région chromosomique du génome du mildiou contenant 3 gènes responsables du contournement du gène de résistance *Rpv3*<sup>4</sup>. Les travaux sont en cours pour identifier les facteurs de virulence impliqués dans l'adaptation du mildiou aux autres gènes de résistance (*Rpv1*, *Rpv10*, *Rpv12*). Ces résultats permettront de développer des outils d'épidémiologie pour accompagner le déploiement durable des variétés résistantes.

Une des pistes pour élargir la diversité des variétés de vigne résistantes est d'inclure des résistances à d'autres maladies, telles que le black-rot ou la flavescence dorée. Dans **VITAE**, des tests en conditions contrôlées ont été mis au point pour évaluer la résistance de la vigne à ces deux maladies. Ils ont permis l'identification d'espèces de *Vitis* résistantes et de nouveaux facteurs de résistance au black-rot. Ces facteurs seront prochainement introgressés dans des lignées de vigne qui serviront pour la sélection de nouvelles variétés résistantes au black-rot (pré-breeding).

## Mobiliser la biodiversité et les services écosystémiques

Construire des systèmes viticoles qui favorisent les services rendus par la biodiversité est une des pistes pour favoriser la résilience des systèmes dans un contexte de changement global. Les travaux du projet ont mis en évidence :

1. le rôle clé de certains taxons comme des familles d'araignées (par exemple les Oxyopes ou les Salticus) ou des chrysopodes (*Chrysopidae*) dans la régulation naturelle des insectes ravageurs de la vigne (comme la cicadelle).
2. que des paysages constitués de petites parcelles de vigne et d'habitats semi-naturels favorisent la régulation naturelle des insectes ravageurs de la vigne<sup>5</sup>.



▲ Photographies de chrysopes, prédateurs naturels de la cicadelle. De gauche à droite, *Chrysoperla* sp. au stade adulte et au stage larvaire.

© Gilles Carcassès.

4 Paineau et al., 2022, « The Characterization of Pathotypes in Grapevine Downy Mildew Provides Insights into the Breakdown of *Rpv3*, *Rpv10*, and *Rpv12* Factors in Grapevines ».

5 Etienne et al., 2023, « Less field-level insecticides, but not fungicides, in small perennial crop fields and landscapes with woodlands and organic farming ».

Les travaux démontrent que combiner ces leviers à travers les échelles spatiales favorise la biodiversité et la multifonctionnalité des systèmes viticoles sans nuire à la productivité des parcelles. Ces résultats ouvrent des perspectives pour la construction de paysages viticoles qui favorisent les fonctions rendues par la biodiversité et limitent les impacts environnementaux.

## Reconcevoir les systèmes de culture

La recherche d'innovations menée auprès de domaines viticoles économes en intrants a permis de lister une cinquantaine de leviers (techniques, organisationnels, économiques). Il est ainsi possible de mieux comprendre comment les intégrer dans les exploitations à travers un jeu de compensations par les facteurs de production, et comment réévaluer les objectifs de production à la baisse.

De même, il est possible de mettre en évidence le rôle tampon de la surface viticole pour dépasser certains blocages dans la mise en place de stratégies de forte réduction des pesticides pour compenser l'augmentation de la complexité technique et organisationnelle. Le suivi de parcelles peu traitées va permettre d'évaluer les impacts des diverses stratégies de gestion identifiées.

## Identifier des incitations économiques et réglementaires

Un travail a été réalisé sur un marché expérimental destiné à évaluer la valorisation par les consommateurs d'un affichage environnemental, spécifiquement orienté sur la biodiversité. L'instauration d'un « biodiv-score » a permis de montrer une augmentation générale des consentements à payer des consommateurs et une revalorisation de la certification agriculture biologique.

En parallèle, le projet **VITAE** travaille sur les leviers assurantiels. Une expérience de choix menée auprès de 400 viticulteurs a permis de mesurer les préférences vis-à-vis d'un produit assurant les pertes de récoltes dues au mildiou et à l'oïdium, tout en les incitant à tester des itinéraires de production à très bas niveaux d'intrants. Les résultats montrent un réel intérêt pour une telle « assurance verte » qui devra être conçue sous forme de « menus incitatifs ». Une expérience de choix a également été conçue pour évaluer la volonté des viticulteurs à intégrer les variétés résistantes dans leur encépagement.

## Prospective

Enfin, le projet intègre un travail de prospective qui permet de croiser les disciplines, les axes de travail et d'élaborer des scénarios interdisciplinaires de sortie des pesticides à l'échelle des filières et des territoires. De premiers scénarios sont en cours de rédaction par les équipes de recherche et seront partagés avec les organisations de la filière viticole (2025). Sur cette base et en tenant compte du contexte socio-économique du secteur, le projet formulera des recommandations concrètes à l'intention des viticulteurs, des instituts techniques et des décideurs politiques.

## ► Perspectives

Le projet **VITAE** va produire de nouvelles connaissances pour la transition agroécologique en viticulture. Il favorise une structuration de la communauté de recherche sur la sortie des pesticides dans le secteur de la vigne et du vin. Cette structuration permet d'envisager d'ores et déjà des réponses collectives aux programmes de recherche tels que le « Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures » (PARSADA), le « Grand Défi Biocontrôle et Biostimulation pour l'Agroécologie » ou les « Programmes et Equi-

pements Prioritaires de Recherche » (PEPR). Cette expertise collective mérite à présent de rejoindre celle des acteurs du développement et des viticulteurs afin d'accélérer la transition vers de nouveaux systèmes de production durables.

## ► Références

- Lucas Etienne, Adrien Rusch, Claire Lavigne, Esther Fouillet, Laurent Delière, et Pierre Franck. « Less field-level insecticides, but not fungicides, in small perennial crop fields and landscapes with woodlands and organic farming ». *Agricultural Systems* 204 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103553>.
- Paola Fournier, Lucile Pellan, Didac Barroso-Bergadà, David A. Bohan, Thierry Candresse, François Delmotte, Marie-Cécile Dufour, et al. « The Functional Microbiome of Grapevine throughout Plant Evolutionary History and Lifetime ». In *Advances in Ecological Research*, 67:27-99. Elsevier, (2022). <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2022.09.001>.
- Olivier Nefti, Nicolas Chartier, Anne Merot, Thibault Peyrard, et Laurent Delière. « To What Extent Can a Phase-out of Pesticides in Viticulture Be Achieved? Learning from the Efforts of a Large Farm Network after 10 Years ». *OENO One* 58, no 2 (2024). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.2.7885>.
- Manon Paineau, Isabelle D. Mazet, Sabine Wiedemann-Merdinoglu, Frédéric Fabre, et François Del-motte. « The Characterization of Pathotypes in Grapevine Downy Mildew Provides Insights into the Breakdown of Rpv3, Rpv10, and Rpv12 Factors in Grapevines ». *Phytopathology* 112, no 11 (2022). <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-21-0458-R>.
- Robin Raveau, Chloé Ilbert, Marie-Claire Héloir, Karine Palavioux, Anthony Pébarthé-Courrouilh, Tania Marzari, Solène Durand, et al. « Broad-Spectrum Efficacy and Modes of Action of Two Ba-cillus Strains against Grapevine Black Rot and Downy Mildew ». *Journal of Fungi* 10, no 7 (2024). <https://doi.org/10.3390/jof10070471>.

## ► Contact

### Coordination

- Coordination du projet : François Delmotte ([francois.delmotte@inrae.fr](mailto:francois.delmotte@inrae.fr)), Hervé Hannin ([herve.hannin@supagro.fr](mailto:herve.hannin@supagro.fr)), Marielle Adrian ([marielle.adrian@u-bourgogne.fr](mailto:marielle.adrian@u-bourgogne.fr))
- Page web du projet : <https://www.cultiver-protger-autrement.fr/les-projets/vitae>
- Contact : [vitae-pmo@inrae.fr](mailto:vitae-pmo@inrae.fr)
- Le site atelier BACCHUS dédié à l'étude de la transition agroécologique des territoires viticoles : <http://www.siteatelier-bacchus.com/fr/>
- L'Observatoire National du Déploiement des Cépages Résistants (OSCAR) : <https://observatoire-cepages-resistants.fr/>

Photographies illustrant les leviers étudiés en vue d'apporter des solutions durables pouvant permettre de déployer à terme et sur le terrain, des systèmes de production performants avec des réductions majeures de pesticides.

**Crédits (de haut en bas et de gauche à droite) :** Christophe Maître ; Kira Hoffmann ; Hans Hillewaert ; Bertand Nicolas ; Adobe Stock ; Myriam Tisserand ; Myriam Tisserand ; Christophe Maître ; Bertand Nicolas ; Christophe Maître ; Bertand Nicolas ; Myriam Tisserand ; Georges Souche ; Getty Image ; Pierre Albaret.



—  
CULTIVER  
PROTÉGER  
*autrement*  
—



[cultiver-proteger-autrement.fr](http://cultiver-proteger-autrement.fr)  
[ppr-cpa@inrae.fr](mailto:ppr-cpa@inrae.fr)



@PPR-CPA