



 dossier de
PRESSE

INRAE

**Agriculture compétitive et durable :
les apports croissants du biocontrôle**

01.	Des odeurs pour lutter contre les ravageurs	04
02.	Les macro-organismes : des alliés de taille	09
03.	Une panoplie de micro-organismes protecteurs	16
04.	Les substances naturelles bénéfiques	21
05.	Déployer le biocontrôle à large échelle : un défi pour la recherche	25
06.	Les vignobles sous bonne garde	31
	Contacts scientifiques	36

Agriculture compétitive et durable : les apports croissants du biocontrôle

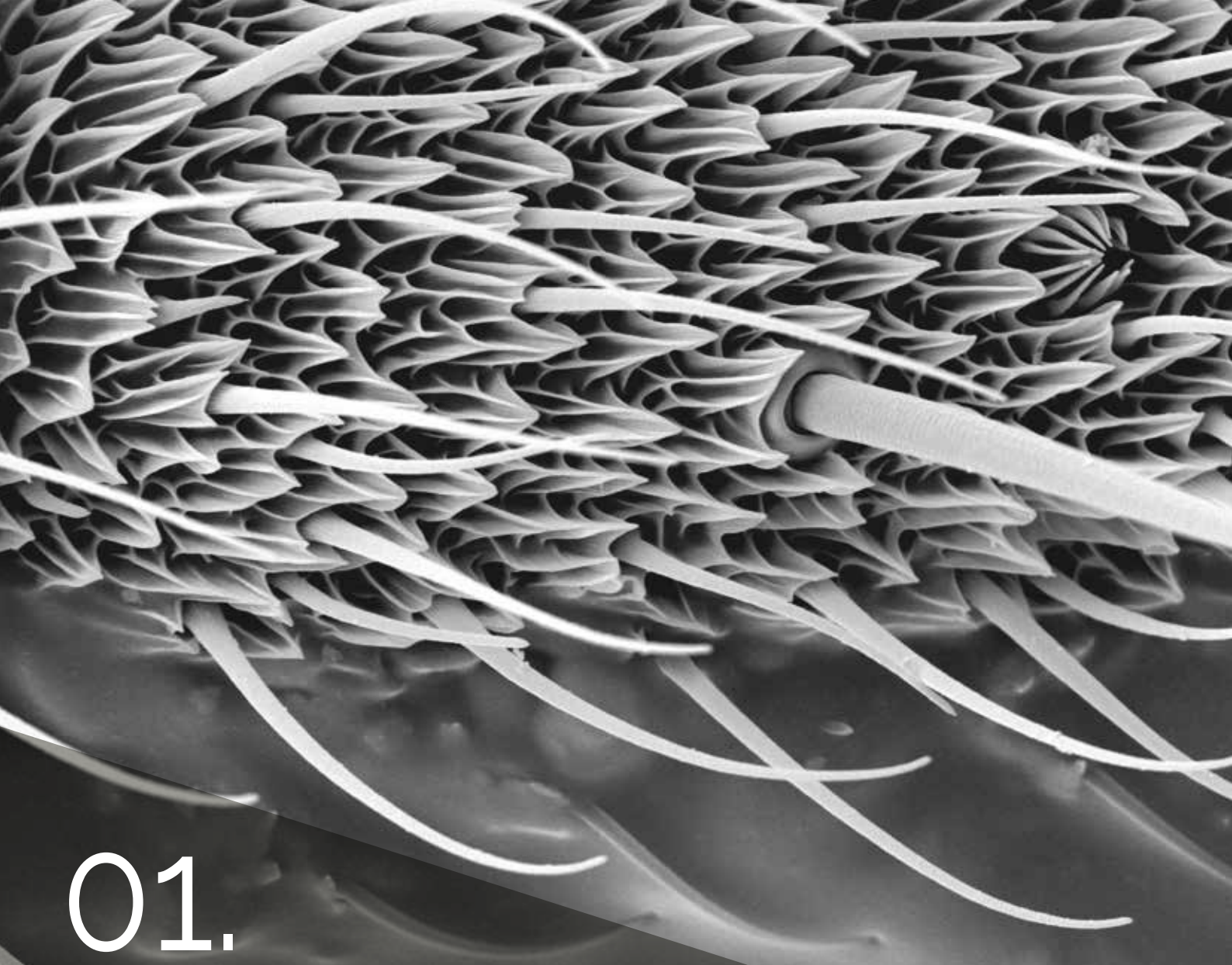
Lancé à l'occasion du Grenelle de l'environnement de 2007, le plan Ecophyto a pour objectif de réduire de 50 % le recours aux produits phytopharmaceutiques en France, à l'horizon 2025. Certaines des substances jugées préoccupantes ont déjà été retirées du marché et d'autres, à l'instar du glyphosate, le seront dans les années à venir. C'est une excellente nouvelle pour l'environnement comme pour notre santé. Mais ça n'est pas sans conséquence pour l'ensemble des filières agricoles.

En effet, par quoi va-t-on remplacer les produits phytosanitaires pour protéger les cultures des bioagresseurs qui les menacent ? Ne risque-t-on pas de voir ressurgir des maladies ou des insectes phytophages jusqu'alors efficacement contrôlés ? Et comment lutter contre les nouvelles espèces envahissantes venues du bout du monde et qui se répandent à toute vitesse sur notre territoire ?

Pour faire face à ces immenses défis, INRAE est en première ligne. Et parmi les stratégies mises en œuvre pour y répondre, le biocontrôle figure en tête de liste. Le biocontrôle, c'est un ensemble de méthodes de protection des cultures basées sur l'utilisation d'organismes vivants ou de substances naturelles. Les produits de biocontrôle sont classés en quatre catégories : les macro-organismes (principalement insectes, nématodes, acariens...), les micro-organismes (virus, bactéries, champignons...), les médiateurs chimiques tels que les phéromones, et enfin les substances naturelles d'origine minérale, végétale ou animale. S'ajoute à ces catégories de produits le biocontrôle par conservation - qui consiste à promouvoir l'action des organismes auxiliaires déjà présents dans l'environnement, par des pratiques ou aménagements des parcelles ou des paysages - et le biocontrôle par acclimatation - qui vise à établir de façon pérenne un auxiliaire exotique pour réguler durablement les populations d'une espèce envahissante.

INRAE n'a pas attendu Ecophyto pour s'intéresser au biocontrôle. Depuis plusieurs décennies, les chercheurs mènent des travaux sur les interactions entre les plantes et leurs ravageurs. Ils développent des méthodes de lutte qui, utilisées seules ou dans le cadre d'une stratégie de contrôle globale, jouent un rôle croissant dans la protection des cultures. Et l'Institut est à l'origine d'innovations qui sont utilisées dans le monde entier, telles que la confusion sexuelle à l'aide de phéromones.

En tant qu'organisme public de recherche finalisée, INRAE s'associe à des partenaires privés pour mettre au point des solutions de biocontrôle et étudie leurs impacts sur la santé et l'environnement. L'Institut propose également des pistes pour aménager les paysages agricoles, en vue de favoriser l'action des auxiliaires de cultures, alliés précieux en agriculture.



01.

Une antenne du papillon *Spodoptera littoralis* vue au microscope électronique. Les expansions visibles sont les « nez miniatures » de l'insecte ou « sensilles olfactives » qui abritent les neurones olfactifs.



Des odeurs pour lutter contre les ravageurs

Dans le cadre du biocontrôle, les chercheurs s'intéressent de près aux odeurs. Celles émises par les plantes d'abord, puisque ce sont elles qui permettent aux insectes ravageurs de les repérer dans le paysage et de les coloniser. Celles émises par les insectes ensuite, et notamment par les femelles pour attirer les mâles lors de la reproduction. Ces odeurs se nomment phéromones lorsqu'elles concernent les échanges entre individus appartenant à la même espèce. On parle de substances allélochimiques pour décrire les échanges entre individus d'espèces différentes, et plus précisément de kairomones, lorsque ces substances profitent à celui qui reçoit le message.

Depuis plus de 40 ans, INRAE étudie l'écologie chimique des insectes ravageurs des cultures et met au point des stratégies de biocontrôle qui impliquent l'utilisation des phéromones et kairomones pour lutter contre ces insectes, en agissant sur leurs comportements, ou pour perturber leur cycle de reproduction.



Noctuelle du coton,
Spodoptera littoralis.

4.

Agriculture compétitive et durable : les apports croissants du biocontrôle

Des bons usages des phéromones

L'utilisation des phéromones pour contrôler les populations de bioagresseurs repose sur trois leviers principaux : le *monitoring*, le piégeage de masse et la confusion sexuelle. Dans le cas du *monitoring*, l'objectif n'est pas tant d'éliminer la menace que de contrôler son évolution afin de déterminer où et quand agir. Ainsi, des pièges disséminés dans des endroits stratégiques permettent de détecter les premiers vols des papillons et l'évolution des populations au cours de la saison de reproduction. Au contraire, le piégeage de masse consiste à attirer un maximum de papillons mâles afin de les supprimer et réduire ainsi la descendance. Enfin, la confusion sexuelle vise à saturer l'air de phéromones, dans le but de désorienter l'insecte et de l'empêcher d'atteindre la femelle. Cette méthode est particulièrement efficace dans le cadre de la lutte contre les processionnaires car la durée de vie du papillon mâle n'est que d'une journée.



Spodoptera littoralis.

Des récepteurs olfactifs dans le viseur

L'écologie, c'est la science qui étudie les interactions entre les individus partageant un même milieu. L'écologie chimique, quant à elle, est un domaine essentiel du biocontrôle et consiste notamment à identifier les molécules odorantes qui déclenchent une réaction chez un insecte ciblé. Mais travailler sur le vivant est un processus long, coûteux et délicat à mettre en œuvre. Il faut en effet élever les insectes, analyser leur comportement et tester une par une toutes les molécules susceptibles de provoquer une réaction, qu'il convient alors d'interpréter. Financé par l'Agence nationale de la recherche, le projet Demeter s'intéresse aux médiateurs chimiques qui peuvent être utilisés dans la lutte contre les bioagresseurs, en se focalisant sur les récepteurs olfactifs de l'insecte. Grâce à la mise en place d'une stratégie qui combine la modélisation informatique et l'expérimentation *in vitro*, il est possible de proposer de nouvelles molécules actives sur ces récepteurs, réduisant le spectre des possibles à tester avec des expériences d'étude du comportement. Cette approche est développée chez un papillon bioagresseur, la noctuelle *Spodoptera littoralis*, dont l'inventaire des récepteurs olfactifs a été établi grâce au séquençage de son génome. En résumé, c'est de l'écologie chimique inversée ! Le principal atout de ce « criblage virtuel », c'est non seulement sa rapidité, puisqu'on ne va tester ensuite expérimentalement que les molécules potentiellement efficaces, mais aussi son exhaustivité. Par exemple, en ciblant un récepteur olfactif à l'aide d'une grande variété de molécules odorantes, les chercheurs d'INRAE augmentent leurs chances d'identifier un agoniste (c'est-à-dire une substance ayant un effet identique) plus attractif que la phéromone produite naturellement par la femelle (idéal pour piéger les mâles) ou au contraire un répulsif particulièrement puissant. Des molécules qui pourront, une fois leur efficacité démontrée expérimentalement, être utilisées dans le cadre de la lutte par *bio-olfacticides*, produits ciblant les récepteurs olfactifs.

Qu'est-ce que ça sent ?

Comment un insecte ravageur utilise-t-il ses récepteurs olfactifs pour identifier la plante la plus adaptée à sa survie et sa reproduction ? C'est ce qu'ont cherché à déterminer des scientifiques d'INRAE en collaboration avec des partenaires académiques. Pour mener à bien leurs recherches, ils se sont intéressés au papillon de nuit *Spodoptera littoralis*. Non seulement parce que sa chenille polyphage est un redoutable ennemi des cultures (coton, tomate, maïs, légumes...) mais aussi parce qu'elle est facile à élever et déjà bien connue des biologistes. En analysant la réaction de 35 de ses récepteurs olfactifs à une grande variété de molécules odorantes, ils sont parvenus à identifier les odeurs auxquelles certains d'entre eux se révélaient sensibles. Et sans grande surprise, ce sont en premier lieu les composés émis par les plantes que mangent les chenilles et par les fleurs qui recèlent le nectar dont se nourrissent les adultes. L'important ici est d'avoir découvert les récepteurs olfactifs impliqués, comme cibles clefs pour la recherche de *bio-olfacticides*. Mais l'examen de ces répertoires de récepteurs apporte aussi des connaissances fondamentales sur les processus évolutifs qui font que les espèces ont une adaptation sensorielle à leur mode de vie, leur alimentation, ou sur le temps d'adaptation à un nouvel hôte. Les chercheurs ont ainsi découvert que certains de ces récepteurs montrent une évolution récente. Et quel rapport avec le biocontrôle ? Eh bien, si l'on identifie un récepteur aux phéromones dont l'évolution est très rapide, on hésitera à développer un piège qui l'exploite. Et pour cause, l'insecte pourra, dans un mécanisme de défense, modifier ce récepteur et établir un nouveau système de communication qui lui permettra d'éviter le danger !

Chenille de *Spodoptera littoralis*.



Le carpocapse, accro à l'ester

Le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*) est, pendant son stade larvaire, l'un des plus dangereux papillons ravageurs des vergers. La carpovirusine, un bio-insecticide, est utilisée avec succès depuis plusieurs années pour éliminer les larves. Mais afin d'améliorer encore l'efficacité du contrôle, il est essentiel de s'attaquer à tous les stades du développement du ravageur. En caractérisant les récepteurs olfactifs de ce papillon (on en compte entre 60 et 70, situés dans les antennes), les chercheurs d'INRAE ont identifié celui qui se révèle sensible à l'ester de poire, une kairomone émise notamment par les poires et les pommes. Une information précieuse pour les chercheurs qui pourraient cibler ce récepteur pour perturber l'attraction des femelles vers les fruits, en association avec le piégeage ou la confusion des mâles par phéromone sexuelle. Ce récepteur nous en apprend également beaucoup sur l'origine des récepteurs aux phéromones sexuelles qui auraient évolué à partir de récepteurs aux kairomones. En effet, le récepteur à l'ester ressemble beaucoup à ces récepteurs aux phéromones, comme un vestige de leur fonction première.



Dégâts de la chenille du carpocapse sur pomme. A droite un trou récent de pénétration de larve, qui se remarque par l'accumulation de déjections. A gauche l'attaque plus ancienne d'une autre larve.

Stop aux mauvaises odeurs!

Les études menées sur la bruche de la féverole, et précédemment sur la pyrale du maïs, ont permis aux chercheurs d'INRAE d'identifier les composés clés à l'origine des relations entre l'insecte et la plante qu'il parasite. Des informations primordiales pour les généticiens qui peuvent ainsi sélectionner des plantes dépourvues des gènes qui contrôlent la biosynthèse des composés attractifs et qui sont donc indécélables pour leurs prédateurs.



Larve de pyrale de maïs.

La bruche de la féverole

Cultivée en France essentiellement pour fournir la farine de fève à destination des pays d'Afrique du nord, et notamment l'Egypte, la féverole a subi de plein fouet les conséquences du plan Ecophyto. Désormais sans pesticide pour la contrôler, la bruche de la féverole (*Bruchus rufimanus*), un petit coléoptère dont la femelle pond ses œufs dans les gousses en formation, peut détruire jusqu'à 50 % de la production. Au point de pousser certains exploitants à jeter l'éponge ! Mais la situation pourrait rapidement s'améliorer. Les chercheurs ont en effet identifié des cocktails de composés attractifs produits par différents organes de la plante, notamment dans la fève, pour attirer les femelles déjà fécondées. Des pièges expérimentaux exploitant ces attractifs ont déjà montré leur efficacité pour capturer les insectes avant qu'ils ne s'en prennent aux plantes. Ces découvertes font l'objet de deux brevets, et de la création d'une start-up de l'agritech, AgriOdor. Après des essais menés sur plus de 80 ha, AgriOdor a démontré que sa solution était efficace quelle que soit la surface ou la modalité de la parcelle (petite, grande, bio, conventionnelle) et va étendre les essais sur de grandes surfaces, tout en poursuivant des recherches sur l'ensemble des oléagineux (Pois et Lentille). Agriculteurs et semenciers sont déjà sur les rangs !



Bruche de la féverole ou *Bruchus rufimanus*.



Pyrale du buis (*Cydalima perspectalis*).

Comment reproduire une phéromone ?

Certains chercheurs d'INRAE sont de véritables maîtres parfumeurs. Leur spécialité, c'est la reproduction de phéromones et kairomones. Une tâche qui exige une grande précision parce que ces substances sont diablement complexes. On y trouve toujours un composé majoritaire, plutôt facile à reproduire, mais aussi deux ou trois composés présents en très faible proportion. Or, ceux-là sont tout aussi indispensables pour provoquer un comportement chez l'insecte. D'autant que la bestiole est tatillonne, ses exigences quant à la qualité du produit et la dose qu'elle doit percevoir sont très précises. Une fois les composés identifiés, des chimistes se chargent de les synthétiser. Ces substances seront enfin déposées dans les bonnes proportions, sur les dispositifs de diffusion, soit dans le cadre d'un piégeage de masse, soit pour induire une confusion sexuelle chez l'insecte ciblé.



Les chenilles processionnaires

Qui ne s'est pas étonné à la vue de ces longs rubans de chenilles se déplaçant en file indienne sur le sol ou le tronc des arbres ? On pourrait presque s'émerveiller d'un tel comportement, si les processionnaires n'étaient d'aussi dangereux bioagresseurs. Pour l'arbre d'abord, puisque les chenilles se nourrissent, selon les espèces, des aiguilles des pins et cèdres ou des feuilles des chênes. Cette importante défoliation entraîne un affaiblissement de l'arbre et un ralentissement de sa croissance, même si l'issue est rarement fatale. Mais surtout, les chenilles libèrent dans l'air des soies urticantes, très allergènes, qui peuvent causer démangeaisons, troubles oculaires et jusqu'à de graves difficultés respiratoires. Les animaux ne sont pas à l'abri, les chiens notamment qui, en léchant leur fourrure ou au contact avec une procession au sol, peuvent développer des œdèmes et une nécrose de la langue. Autant dire que la lutte contre la chenille processionnaire constitue un véritable enjeu de santé publique. INRAE, qui explore depuis de nombreuses années toutes les pistes permettant de contrôler le développement de ces insectes, a mis au point des méthodes de lutte efficaces et novatrices, basées notamment sur l'utilisation des phéromones.



Chenilles processionnaires.

Procerex

Voilà un piège très efficace aujourd'hui pour capturer les papillons processionnaires du pin. Conçu et breveté par INRAE en collaboration avec la société Protecta, Procerex utilise une capsule de phéromones pour attirer les mâles vers un récipient opaque contenant un mélange d'eau et d'huile végétale (pour éviter l'évaporation). Six dispositifs suffisent pour couvrir un hectare, dans le cadre du piégeage de masse. Les phéromones agissent durant 10 à 12 semaines, ce qui correspond à l'ensemble de la période de vol du papillon. Des expérimentations menées en 2017 ont montré que la terre de diatomée (une roche formée de « squelettes » de diatomées qui sont des algues unicellulaires) mise au fond du piège pouvait remplacer le mélange eau et huile végétale, facilitant ainsi l'usage de ce modèle de piège.

Le cupidon de la processionnaire

Tous les moyens sont bons pour lutter contre la processionnaire du pin, y compris les plus originaux. Par exemple, l'usage de pistolets de paintball. Développée par INRAE en partenariat avec M2i Life Sciences, cette méthode consiste à propulser sur le tronc des arbres, à une hauteur de six à neuf mètres, des billes biodégradables contenant un gel chargé de phéromones microencapsulées dans de la cire d'abeille. Bref, semer la confusion sexuelle dans les rangs des papillons. Trois cents billes de « phero-balls » par hectare ou 30 billes pour un arbre isolé sont nécessaires pour saturer l'air de phéromones durant quatre mois et ainsi réduire considérablement les chances pour le mâle de repérer la femelle.



Usage de paintball contre la processionnaire.

Contre la pyrale du buis : SaveBuxus



Le buis, plante emblématique des jardins publics et patrimoniaux, et largement présente dans le milieu naturel, est en grave danger. En cause, la pyrale du buis (*Cydalima perspectalis*), un papillon nocturne originaire d'Asie centrale, introduit fortuitement à la fin des années 2000. Les dégâts que causent les chenilles sont considérables. En effet, trois jours suffisent à défolier totalement un arbuste qui, bien que robuste, finit par dépérir, d'autant que trois générations de larves peuvent se succéder en une année. En forêt, les conséquences, quoique moins visibles, sont tout aussi préoccupantes car les buxaias constituent un habitat privilégié pour certaines espèces et les racines du buis sont souvent essentielles pour maintenir les sols ou les blocs rocheux. Les projets SaveBuxus I (2014-2017) puis SaveBuxus II (2018-2020) ont pour objectif de concevoir des solutions de biocontrôle contre la pyrale, en ciblant tous les stades de son développement. Et notamment les adultes, par le biais du piégeage et de la confusion sexuelle. Si l'élimination totale de ce nouvel agresseur est désormais illusoire, l'usage conjoint des différentes solutions de biocontrôle pourrait permettre de maintenir sa nuisance à un niveau acceptable.

Pyrale du buis (*Cydalima perspectalis*).

Buxatrap

Conçu et développé par INRAE en collaboration avec la société SanSan (un brevet d'invention a d'ailleurs été déposé), Buxatrap est un piège à double-emploi à la mise en œuvre volontairement simplifiée pour être utilisable aussi bien par les professionnels que les particuliers. Il peut être employé comme outil de *monitoring* et de piégeage de masse des mâles de la pyrale. Il a montré ses excellentes performances sur ce ravageur. Commercialisé par la société Koppert, il consiste en une cuve de plastique vide surmontée d'un réceptacle dans lequel on place le premier diffuseur contenant la phéromone. Attirés par l'odeur, les papillons pénètrent et stationnent dans la cuve grâce à un deuxième diffuseur de phéromone. Ils ne peuvent en ressortir et meurent d'épuisement. La phéromone exerce son pouvoir attractif sur une surface d'environ 100 à 500 m² pendant plusieurs mois. Conçu dans le cadre du projet SaveBuxus, Buxatrap est désormais utilisé avec la même efficacité pour la lutte contre les chenilles processionnaires du pin et du chêne... avec évidemment les phéromones adaptées à ces agresseurs.



Buxatrap et pyrales.



Tous aux abris!



La culture maraîchère sous abri basée sur le biocontrôle n'est pas de tout repos. Dans ces environnements où se succèdent plusieurs cultures de différentes espèces au cours d'une même année, l'exploitant doit surveiller attentivement l'état sanitaire de ses cultures. En effet, dans un lieu aussi confiné, il est primordial d'identifier au plus tôt la présence d'un ravageur et de réagir très rapidement, souvent dans les 48 heures, sous peine de perdre une partie de la production. Pour les aider dans leur prise de décision, les chercheurs d'INRAE mènent des expérimentations dans des abris comparables aux leurs. Confrontés aux mêmes situations et notamment aux attaques de bioagresseurs (insectes, champignons, virus...), ils discutent avec les maraîchers des méthodes qu'ils ont suivies pour régler un problème. En insistant sur le fait qu'il ne suffit pas d'additionner les leviers. Il convient aussi de savoir lesquels utiliser (auxiliaires, produits de biocontrôle issus de micro-organismes, substances naturelles, interventions physiques sur les plantes...), à quel moment, et en tenant compte des interactions possibles entre les différentes actions. Pas toujours facile pour des maraîchers dont l'activité génère une charge de travail quotidienne souvent considérable.



02.

Trichogramma dendrolimi mâle avec soies importantes au niveau des antennes.



Les macro-organismes : des alliés de taille

Les macro-organismes sont les agents de biocontrôle les plus répandus et leur efficacité se révèle parfois comparable à celle des produits phytosanitaires. Certains, tels les trichogrammes, parasitent les œufs des ravageurs, d'autres, comme les nématodes, s'en prennent aux larves tandis que les chauves-souris dévorent l'insecte adulte. Ces valeureux auxiliaires sont mis à profit de trois manières différentes. La lutte par acclimatation, apparue à la fin du XIX^e siècle, consiste à introduire un auxiliaire exotique de façon durable, afin de lutter contre un ravageur souvent originaire de la même région. Dans le cas de la lutte par augmentation, des auxiliaires sont relâchés dans les cultures dans le but de contrôler les bioagresseurs durant une période donnée. Enfin, la lutte par conservation s'attache à aménager le paysage ou à modifier les pratiques culturales afin de favoriser le développement et le maintien des ennemis naturels des ravageurs.



La lutte par augmentation De précieuses micro-guêpes : les trichogrammes



Trichogramma brassicae.

Ne vous fiez pas à leur taille minuscule, les trichogrammes constituent de puissants alliés dans la lutte contre les ravageurs. Ces micro-guêpes, mesurant souvent moins d'un millimètre de long, sont des parasitoïdes oophages : leurs larves se développent à l'intérieur des œufs d'autres insectes qui en meurent rapidement. Par leur action, ils entravent notamment le développement des chenilles des lépidoptères très voraces et donc très néfastes pour les végétaux. A INRAE, cela fait plus de 40 ans que les chercheurs étudient ces précieux auxiliaires et développent des techniques innovantes pour permettre leur utilisation dans une stratégie de biocontrôle.

Une collection de trichogrammes unique au monde

Le Centre de ressources biologiques EP-Coll (en anglais *Egg Parasitoids collection*) géré par INRAE, est dédié à l'étude des parasitoïdes oophages à des fins de recherche et développement en biocontrôle ou à des recherches plus académiques associées. Cette structure, unique au monde, met à disposition de la communauté scientifique internationale, des souches de trichogrammes de différentes espèces, origines et fonds génétiques. Plus d'une centaine de souches y sont maintenues vivantes. Les chercheurs entretiennent également de nombreux « produits dérivés » pour des travaux de caractérisation intégrative tels que des insectes conservés dans de l'alcool, de l'ADN, ou encore des montages d'exosquelettes. EP-Coll va permettre notamment de compléter les connaissances sur la diversité des trichogrammes ainsi que sur leurs distributions géographiques et écologiques. A partir des ressources disponibles, EP-Coll contribue aussi au développement de projets d'améliorations génétiques d'agents de biocontrôle.

Trichogramma mâle.



L'exemple emblématique du biocontrôle de la pyrale du maïs

La chenille de la pyrale *Ostrinia nubilalis* cause d'importants dommages aux cultures de maïs. Dès le milieu des années 1970, INRAE a identifié un trichogramme (*Trichogramma brassicae*) capable de localiser, parasiter et finalement tuer les œufs de pyrale, en vue de remplacer efficacement les insecticides chimiques. Mais il aura fallu plus d'une dizaine d'années de recherche, menées en collaboration avec la start-up



Chenille de la pyrale du maïs.

Biotop (aujourd'hui société Bioline AgroSciences du groupe In Vivo) pour développer une solution efficace et économiquement compétitive. Dix ans durant lesquels les chercheurs vont s'attacher à mettre au point un procédé de production de masse des trichogrammes, des techniques de stockage et des stratégies de lâchers optimisées. Les premiers essais menés au cours des années 80 se sont révélés très concluants, la micro-guêpe se montrant aussi efficace que les produits phytosanitaires pour contrôler le bioagresseur. Seul bémol, son utilisation s'était révélée plus contraignante qu'un pesticide, notamment parce que trois lâchers étaient nécessaires au cours de la saison. Désormais, un seul lâcher suffit grâce à la mise au point de diffuseurs biodégradables contenant des trichogrammes émergeant à intervalles réguliers. Selon les cas, ils peuvent être disposés manuellement dans les parcelles, ou largués par drone ou hélicoptère.

“ 150 000 ha sur les 500 000 ha de maïs traités contre *Ostrinia nubilalis* en France, le sont désormais grâce aux trichogrammes. ”

Auxiliaire de déminage

Détectée pour la première fois en Europe en 2006, la mouche mineuse sud-américaine de la tomate (*Tuta absoluta*) fait des ravages dans tout le bassin méditerranéen, où les pertes peuvent localement atteindre 100% ! Parmi les méthodes employées pour contrôler ce lépidoptère figure l'utilisation d'un auxiliaire tout aussi vorace : *Trichogramma achaeae*. Les œufs de cette micro-guêpe sont stockés dans des diffuseurs biodégradables qui doivent être placés dans les parcelles dès la détection des premiers vols du ravageur. Utilisée en association avec d'autres agents de biocontrôle ciblant les larves et le papillon, cette méthode se révèle efficace pour limiter l'impact du bioagresseur.





Quand le biocontrôle se met au ver

Les nématodes entomopathogènes sont des vers microscopiques qui se développent et se multiplient exclusivement aux dépens des insectes. Présents dans les sols jusqu'à une profondeur de 80 cm, ils attendent immobiles qu'un hôte passe à leur portée ou se déplacent pour l'atteindre. Leur mode d'action est fascinant. Après s'être introduits dans le tube digestif des larves, ils libèrent dans le sang des insectes des bactéries (symbiotiques des nématodes) qui se multiplient rapidement tout en sécrétant des toxines. La mort de l'hôte par septicémie survient sous 48 heures environ. Les bactéries dégradent alors les tissus de l'insecte, permettant aux nématodes de se nourrir, de se multiplier et d'effectuer leur propre développement larvaire. Mais le plus étonnant, c'est qu'une fois les ressources nutritives épuisées, les nématodes « récupèrent » leurs bactéries symbiotiques, avant de quitter le cadavre de l'insecte pour infester un autre ravageur.



dossier de
PRESSE

Les collections de nématodes entomopathogènes et de leurs bactéries symbiotiques au service du biocontrôle

Auparavant réparties dans différents laboratoires, les collections de nématodes entomopathogènes sont désormais regroupées au sein du centre INRAE Occitanie-Montpellier. Une centaine de souches vivantes composent la collection, auxquelles il faut ajouter près de 600 souches de bactéries symbiotiques des nématodes. Les chercheurs étudient notamment le génome de ces bactéries afin de mieux comprendre les moyens qu'elles mettent en œuvre pour tuer l'insecte et inhiber les autres bactéries présentes dans l'organisme hôte. Ces travaux ont déjà permis d'identifier une bactérie efficace dans la lutte contre la larve du taupin, un petit coléoptère qui s'attaque notamment aux légumes-racines. Problème, ces bactéries sont totalement dépendantes de leur partenaire nématode pour rentrer dans l'insecte. Or, ce dernier est incapable de percer l'épaisse cuticule du taupin. Dans le cadre du projet EcoPhyto Pro-Bio-Taupin, des études complémentaires sont en cours afin de rechercher des facteurs responsables du pouvoir pathogène de la bactérie. Par exemple, une molécule bio-insecticide qui pourrait être produite dans le cadre d'un partenariat industriel.



Adulte de taupin des moissons,
Agriotes lineatus L.



Larves infestantes (stade L3)
de nématode (*Steinernema*).

Les vers, futurs coursiers du biocontrôle

Le projet Nemato-Vectoring s'intéresse aux moyens d'employer les nématodes comme vecteurs d'agents de biocontrôle. En étudiant le microbiote des nématodes, les chercheurs d'INRAE ont en effet découvert qu'il n'hébergeait pas seulement des bactéries symbiotiques, mais aussi d'autres bactéries présentant potentiellement des propriétés bénéfiques à la santé des plantes. Or actuellement, le processus industriel de production des nématodes limite le développement de leur microbiote. Ce processus comporte deux étapes, la production d'un nématode dépourvu de microbiote d'une part et la production de sa bactérie symbiotique d'autre part, ces deux éléments étant ensuite réassociés pour constituer le produit commercialisé. Pourquoi alors ne pas travailler sur cette réassociation pour véhiculer des bactéries d'intérêt agronomique dans l'environnement de la plante ? C'est tout l'enjeu du projet, qui va s'attacher maintenant à reconstruire le microbiote des nématodes en les réassociant à chacune des bactéries préalablement identifiées et à mesurer leur efficacité en biocontrôle. Si les résultats sont concluants, les industriels pourraient produire en masse de nouveaux auxiliaires de culture plus performants. En parallèle, les chercheurs s'attachent également à caractériser les propriétés bénéfiques des bactéries du microbiote du nématode pour la plante.

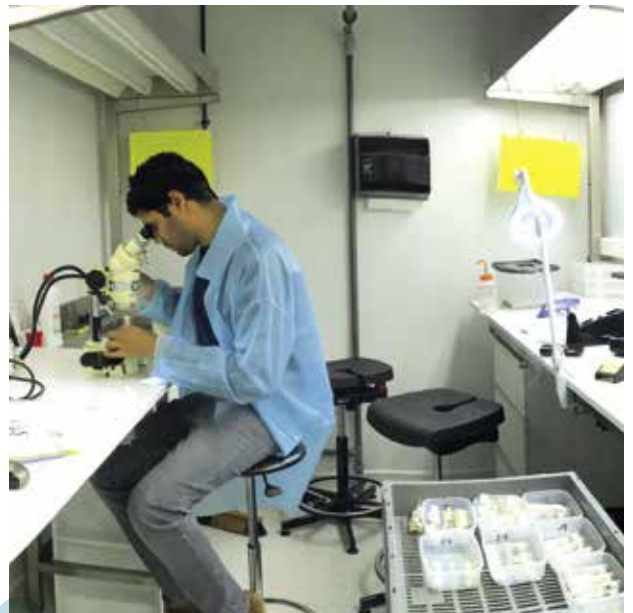


Lutte par acclimatation

Si les bioagresseurs récemment introduits, comme le cynips du châtaignier ou la drosophile *Drosophila suzukii*, causent autant de dégâts, c'est souvent parce qu'ils trouvent dans la zone qu'ils envahissent des ressources importantes et peu, voire aucun prédateur susceptible d'entraver leur développement. Mais ceux-ci existent dans leur habitat d'origine ! Dans le cadre des opérations de lutte biologique par acclimatation, les chercheurs d'INRAE s'efforcent donc d'identifier ces précieux auxiliaires exotiques. Mais pas seulement. Ils s'assurent aussi que ces nouveaux venus ne représentent aucun danger pour les espèces indigènes non-cibles. Et pour cause, la lutte par acclimatation vise à les installer durablement dans notre paysage pour qu'ils fournissent aux agriculteurs un service pérenne et gratuit.

Entomopolis : les insectes sous haute surveillance

Mastrus ridens, *Torymus sinensis*, *Dryocosmus kuriphilus*, *Drosophila suzukii*... Pour ces auxiliaires et ravageurs d'origine exotique, pas question de mettre une patte dehors ! Pour élever et étudier ces insectes soumis à réglementation ou en tout cas à certaines précautions, l'Institut Sophia Agrobiotech (INRAE, CNRS, université Sophia-Antipolis) a conçu en 2010, Entomopolis, un bâtiment de bioconfinement isolé du reste des installations. D'une surface d'environ 220 m², il n'a cessé depuis d'évoluer dans le but d'améliorer les conditions de bio-confinement. Le bâtiment a ainsi été remanié pour satisfaire aux exigences du décret de 2012 relatif aux conditions d'autorisation d'entrée sur le territoire et d'introduction dans l'environnement de macro-organismes non indigènes dans le cadre du biocontrôle : pièces isolées par sas et maintenues en dépression pour que l'air circule de l'extérieur vers l'intérieur ; pièges englués et pièges UV pour capturer les éventuels fugitifs ; verrouillage automatique empêchant l'ouverture simultanée de deux portes du bâtiment... Bref, un insecte qui entre à Entomopolis n'en sort qu'avec un laisser-passer en bonne et due forme ou sous forme inerte.



Bâtiment Entomopolis.

Quand la guêpe prend la mouche



Drosophila suzukii.

Dix ans. C'est le temps qu'il aura fallu à *Drosophila suzukii*, un moucheron originaire d'Asie, pour coloniser l'ensemble de notre territoire. Avec des conséquences désastreuses, car contrairement à la plupart des drosophiles qui pondent leurs œufs dans des fruits en décomposition, *D. suzukii* s'attaque aux fruits en cours de maturation. On estime que 80 à 90 espèces de fruits cultivés et sauvages sont aujourd'hui attaquées par ce bioagresseur, entraînant des pertes pouvant atteindre 80 % de la production. Dans le cadre du projet international Dropsa (2013-2017), les chercheurs d'INRAE ont participé à l'inventaire des parasitoïdes naturels de ce ravageur en Asie et testé sous quarantaine en laboratoire l'efficacité de certaines souches. Après plusieurs années de recherche, ils sont parvenus à isoler un candidat prometteur, une micro-guêpe du genre *Ganaspis* qui se développe au détriment de la larve de drosophile. Les équipes INRAE travaillent dorénavant pour vérifier que cet auxiliaire candidat ne présente pas de risque pour la biodiversité et qu'il est capable de réguler efficacement les populations de drosophiles sur le terrain. Il y a urgence car *D. suzukii* représente aujourd'hui près de 50 % des drosophiles capturées en France sur les fruits rouges. On la trouve même dans les rayons fruits et légumes des supermarchés !



Le crépuscule du cynips du châtaignier

Une *success story*, la formule ne semble pas exagérée quand il s'agit d'évoquer la lutte contre le cynips du châtaignier (*Dryocosmus kuriphilus*). Cette micro-guêpe galligène, originaire de Chine, dévaste les exploitations depuis son arrivée en Europe, entraînant des pertes qui peuvent atteindre 100% chez certains producteurs. Mais elle affecte aussi les apiculteurs car sur les châtaigniers touchés, les fleurs sont moins nombreuses. La bonne nouvelle, c'est qu'un parasitoïde très efficace provenant lui aussi de Chine (*Torymus sinensis*) a prouvé son efficacité dans la lutte contre le cynips, dès la fin des années 80, d'abord au Japon, puis aux Etats-Unis. En Europe, c'est l'Italie qui, la première, a dû faire face à ce dangereux bioagresseur, au début des années 2000. La réaction a donc été rapide et, dès 2005, les premiers lâchers de *T. sinensis* ont été réalisés en Italie puis en France dès 2011, suite à la mise en place d'un comité de pilotage impliquant INRAE et les principaux porteurs d'enjeux. Avec succès puisque, reproduits chaque année, ces lâchers contribuent à réduire progressivement les infestations de cynips. Non seulement elles baissent régulièrement dans toutes les régions où l'auxiliaire est introduit, mais les prélèvements annuels montrent que l'auxiliaire s'y installe de façon durable. De quoi redonner le sourire aux castanéiculteurs et aux apiculteurs.



Le parasitoïde *Torymus sinensis* (à gauche) efficace dans la lutte contre *Dryocosmus kuriphilus* (à droite).



Dégâts de la chenille du carpocapse dans une pomme : une galerie aboutissant directement aux pépins qui seront dévorés par la larve.

Mastrus ridens va croquer le carpocapse de la pomme

La pomme est le fruit le plus consommé en France. Toutefois, sa culture nécessite généralement une grande quantité de traitements à base de pesticides, notamment pour lutter contre son principal insecte agresseur, le carpocapse *Cydia pomonella*. 30 à 40% des traitements insecticides le ciblent spécifiquement ! Lancé en 2014, le projet Ecophyto Bioccyd, porté par INRAE, vise à évaluer des solutions de biocontrôle de ce ravageur, la principale piste reposant sur l'acclimatation en France de *Mastrus ridens*, un parasitoïde attaquant le dernier stade de la larve. Cette petite guêpe d'Asie centrale n'est pas une inconnue. Introduite en 1995 aux États-Unis, elle parasite désormais jusqu'à 70% des cocons de carpocapse. Afin d'évaluer la spécificité de *M. ridens* dans un contexte européen, les chercheurs de l'INRAE ont confronté l'auxiliaire à une dizaine d'espèces locales non-cibles présentant des ressemblances écologiques ou phylogénétiques avec *C. pomonella*. Ces travaux ont mis en évidence une forte spécificité de *M. ridens*, un argument probablement décisif dans la délivrance de l'autorisation de son évaluation au champ. Prochaine étape donc, les lâchers sur une bonne cinquantaine de sites. Une opération dont il reste encore à trouver le financement mais qui, en cas de réussite, pourrait rapidement rapporter des bénéfices en termes de régulation globale des populations de *C. pomonella*.



La lutte par conservation

Et si l'on prenait soin des auxiliaires naturellement présents dans les paysages agricoles ? C'est tout l'enjeu de la lutte biologique par conservation, qui vise à conserver ou augmenter les populations des ennemis naturels des ravageurs. Où l'on découvre que finalement, les besoins des insectes, araignées, oiseaux et autres chauves-souris ne sont guère différents des nôtres. Ce qu'ils recherchent ? Le gîte, le couvert, un environnement sain, le tout aisément accessible. A INRAE, les chercheurs se mettent en quatre pour chouchouter cette main-d'œuvre autochtone et contribuer à son essor.

L'organisation des bords de parcelles et des paysages

Comprendre comment l'organisation des paysages agricoles et des bords de parcelles affecte la dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels, voilà l'une des missions menées par plusieurs unités de recherche INRAE. Pour cela, les chercheurs cartographient les paysages de culture, par exemple les vergers de pommiers de la basse vallée de la Durance (sud-est de la France). Ils s'efforcent d'identifier

tous les éléments qui les composent : bois, haies, fossés, prairies, parcelles en agriculture biologique ou conventionnelle, bref tout ce qui peut influencer la dynamique des auxiliaires de culture. Ensuite ils évaluent les interactions entre les ravageurs et leurs ennemis. Ces observations leur permettent de mettre en relation l'abondance des insectes phytophages et de leurs ennemis naturels, avec les caractéristiques du paysage. Ces études tendent à démontrer que, dès qu'il s'agit de lutte par conservation, l'aménagement de la parcelle est parfois moins important que l'organisation générale du paysage qui l'entoure. Avec une nuance, cependant. Il semblerait en effet qu'un bon environnement, propice à l'épanouissement et au déplacement des ravageurs, soit davantage nécessaire aux abords des parcelles qui reçoivent

beaucoup de traitements phytosanitaires. En agriculture moins intensive, au contraire, les auxiliaires se développeraient naturellement dans les cultures, où ils trouveraient les proies nécessaires à leur subsistance et leur reproduction.



Les mésanges, gardiennes des vergers

Que mangent les mésanges ? Des chenilles ! Les larves de lépidoptères représentent jusqu'à 70 % de leur alimentation. Autant dire que ces gracieux passe-reaux sont des alliés de poids dans la lutte biologique. A condition de leur offrir un environnement sain, comme l'ont démontré les chercheurs d'INRAE. En 2001, ils ont installé des nichoirs dans les vergers de producteurs de pommes conventionnels et en agriculture biologique. Et durant plus de dix ans, ils ont suivi la biologie de reproduction des oiseaux, répertoriant le nombre de couples à l'hectare, les dates de ponte ou encore le nombre d'oisillons atteignant le stade d'envol. Les nichoirs exposés aux pesticides ont été plus fréquemment abandonnés que ceux installés en vergers bio. En outre, bien que ces produits soient conçus pour cibler les insectes, on note, à nombre d'œufs équivalent, beaucoup moins de naissances à l'hectare dans les nichoirs placés en conventionnel qu'en bio. Et la mortalité des poussins y est aussi nettement plus importante. D'autres résultats montrent que les mésanges des vergers bio se nourrissent autant sur les pommiers que dans les haies alentour, alors qu'en conventionnel, elles ne fréquentent que les haies. Une raison peut expliquer ce comportement : les pesticides répandus en conventionnel éliminent la plupart des proies de la mésange dans la culture, ce qui les pousse à chasser à l'extérieur de la parcelle.



Mésange charbonnière et son nichoir.





Soigner le mal par le mâle : la Technique de l'insecte stérile



dossier de
PRESSE



Drosophila suzukii
en train de pondre.

Et pourquoi ne pas se servir d'un insecte nuisible contre lui-même ? C'est le principe de la Technique de l'insecte stérile (TIS), née il y a plus de 60 ans aux Etats-Unis. Cette technique consiste à élever puis à stériliser de grandes quantités d'insectes mâles qui seront ensuite relâchés dans l'environnement. Au moment de l'accouplement, ces mâles stériles entrent en compétition aux yeux des femelles avec les mâles fertiles naturellement présents. Les femelles s'accouplant avec des mâles stériles génèrent des descendants non viables, contribuant ainsi à réduire la taille globale de la population de ravageurs. La question du déploiement de la Technique de l'insecte stérile sur notre territoire se pose actuellement dans le cadre du Collectif TIS lancé par le CTIFL et INRAE et qui réunit les acteurs français concernés par le sujet. En partenariat avec le CTIFL et le Cirad, les équipes INRAE se mobilisent sur cette question au travers de plusieurs projets visant à étudier la faisabilité de la technique contre divers ravageurs : la mouche orientale des fruits (*Bactrocera dorsalis*) à la Réunion, la mouche méditerranéenne des fruits (*Ceratitis capitata*) en Corse et la drosophile du cerisier (*Drosophila suzukii*).



Spores de *Botrytis cinerea* en début de germination vues au microscope optique.

03.



Une panoplie de micro-organismes protecteurs

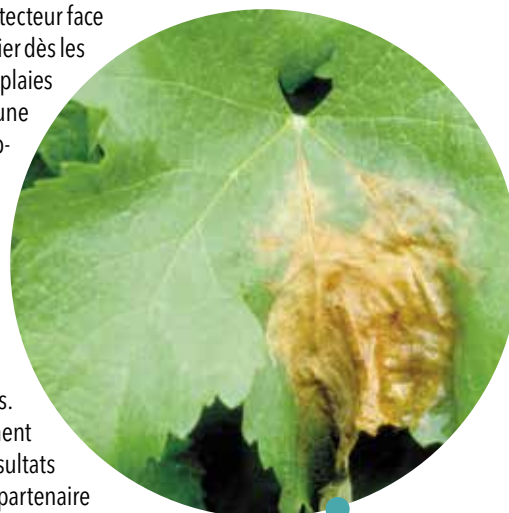
Virus, bactéries, champignons... d'emblée et parfois à tort, ces noms inquiètent et leur évocation fait surgir, dans notre esprit, une funeste farandole d'affections fatales. Pour les chercheurs d'INRAE qui les étudient depuis des décennies, certains de ces micro-organismes se révèlent au contraire très utiles pour protéger les plantes des maladies et d'autres bioagresseurs. Aujourd'hui, une vingtaine d'entre eux sont utilisés et leur efficacité se révèle parfois remarquable. Leur principal atout : un champ d'action très spécifique, qui permet de mener des actions ciblées sur un bioagresseur, sans altérer la diversité et la dynamique du reste de la population.



Des candidats bactériens et fongiques

Beaucoup d'appelés, très peu d'élus

Pourquoi certains plants de tomate élevés sous serre affichent-ils une santé de fer, quand la plupart de ceux qui l'entourent sont sévèrement frappés par le champignon *Botrytis cinerea*? Peut-être parce qu'ils sont colonisés par une flore bénéfique qui assure un rôle protecteur face à l'agent pathogène. Cette hypothèse, les chercheurs d'INRAE ont décidé de la vérifier dès les années 90. Pour cela, ils ont prélevé des échantillons de plantes indemnes sur des plaies causées par l'arrachage d'une feuille (comme pour nous, ces blessures constituent une porte d'entrée pour les microbes) et ont observé les micro-organismes qui s'y développaient. Plus de 200 souches jugées potentiellement bénéfiques ont été identifiées, et à leur tour confrontées au champignon pathogène. A l'issue de ce criblage, 80% des micro-organismes ont été éliminés. Pour les autres, les tests se sont poursuivis en enceinte climatisée sur des plantes élevées en pot. Quatre candidats, sur les 200 souches de départ, se sont révélés particulièrement efficaces, une bactérie affichant même un taux de protection de 100% contre *B. cinerea*! Mais à l'issue des tests en condition d'exploitation réelle, c'est finalement un champignon, la souche L13, qui sera retenu, la bactérie offrant une moindre régularité dans les résultats. Les travaux de recherche sur ce précieux micro-organisme se poursuivent, notamment pour envisager son utilisation en complément d'autres méthodes de lutte. Les résultats nécessaires à l'obtention d'un dossier d'homologation étant déjà bien aboutis, un partenaire industriel a été identifié pour poursuivre l'exploitation des propriétés de ce micro-organisme.

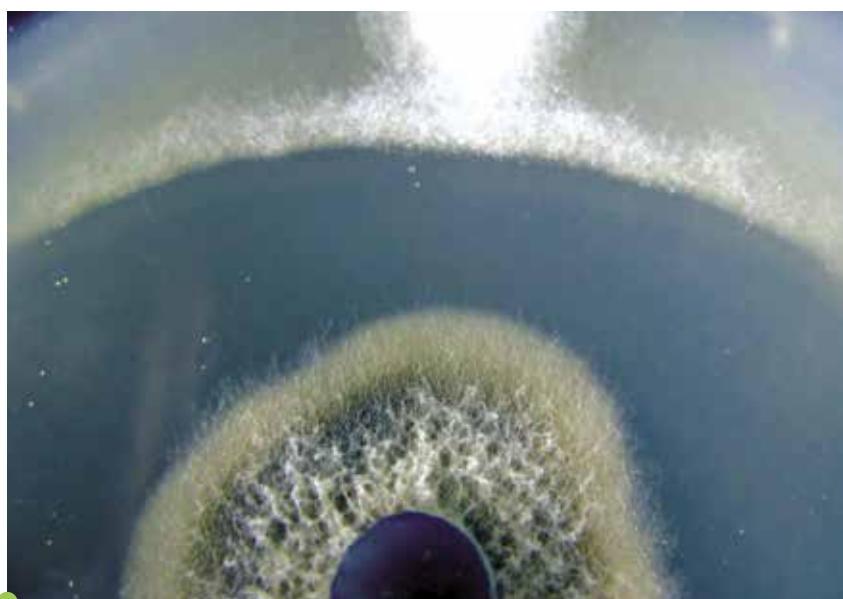


Dégâts sur une feuille de vigne dus à *Botrytis cinerea*.

Oomycide volontaire

Il n'y a pas que les végétaux qui soient menacés par les champignons oomycètes pathogènes. Ces micro-organismes causent aussi de gros dégâts en pisciculture où ils parasitent notamment les truites et les saumons (adultes et œufs). La lutte contre ces bioagresseurs est difficile, notamment en raison de leur grande capacité à contourner les pesticides et les résistances des plantes. Mais heureusement, les chercheurs d'INRAE ont réussi

à identifier, à partir de biofilms d'oomycètes, une souche de champignon aux propriétés anti-oomycètes. Baptisée Y3 (*Ascomycota* sp.), elle sécrète, pour se défendre, une molécule biocide très efficace contre les oomycètes, même à très faible dose. Des tests, en laboratoire, montrent qu'elle tue toutes les espèces d'oomycètes auxquelles on l'a confrontée. Il faut à présent confirmer ces résultats spectaculaires lors d'expérimentations en conditions de production. C'est l'objectif poursuivi par un projet de valorisation industrielle en cours. Est-il préférable d'utiliser le champignon vivant, de n'employer que la molécule qu'il produit, ou de synthétiser cette dernière? Des recherches complémentaires sont encore nécessaires, notamment pour s'assurer de l'innocuité de la molécule vis-à-vis des autres organismes. La commercialisation de ce nouvel agent de biocontrôle pourrait avoir lieu d'ici cinq ans.



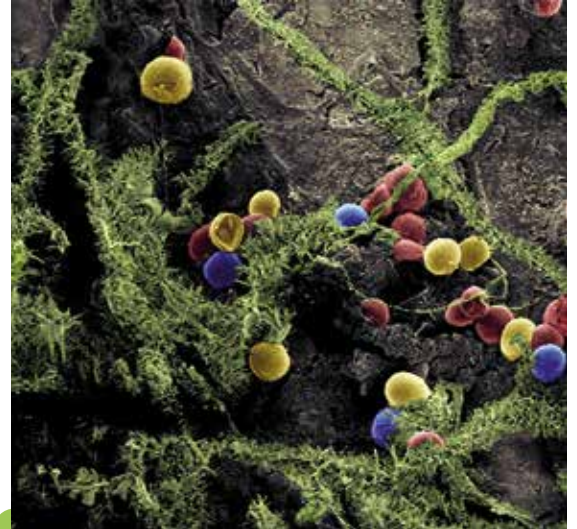
L'oomycète *Phytophthora parasitica* en confrontation avec la souche Y3 (*Ascomycota* sp.).



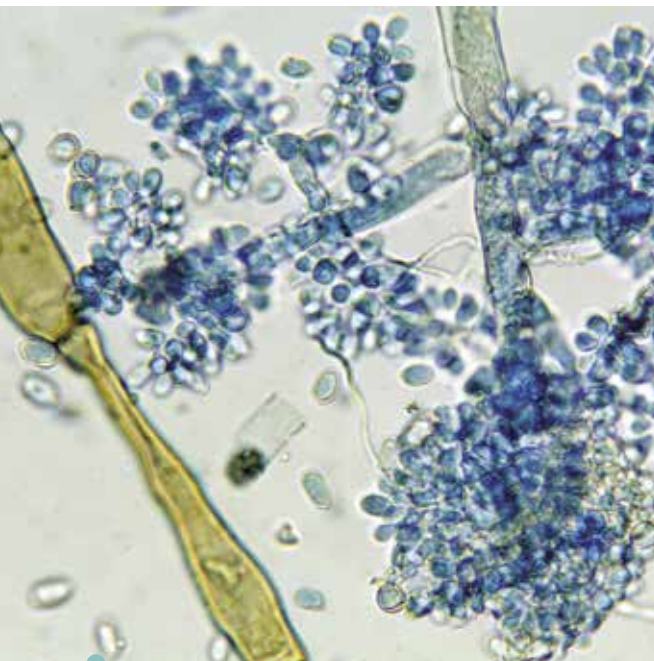
Détourner les propriétés des biofilms

Biofilm d'horreur

Les oomycètes, des micro-organismes eucaryotes filamenteux, sont responsables de nombreuses maladies affectant les plantes, parmi lesquelles le tristement célèbre mildiou qui, s'il n'est pas combattu, peut anéantir l'intégralité d'une récolte en un temps très court. Tomates, pommes de terre, vignes, châtaigniers comptent parmi les espèces les plus menacées par ces micro-organismes taxonomiquement proches des algues brunes. Depuis plusieurs années, les chercheurs d'INRAE étudient la biologie des oomycètes phytopathogènes. Et notamment la manière dont ils utilisent leurs spores flagellées pour développer un biofilm constitué de quelques centaines, voire milliers de cellules, à la surface de la plante hôte. Parallèlement, ils s'efforcent d'identifier des micro-organismes capables d'interrompre la formation de cet inoculum avant qu'il n'ait le temps d'infecter la plante. Avec déjà des résultats très encourageants, mais aussi quelques surprises. Ainsi, lors de tests en laboratoire, les scientifiques ont observé dans les biofilms d'oomycètes, des micro-organismes normalement présents dans les sols, où ils se nourrissent de bactéries. Si la raison de leur présence reste à préciser, elle n'est pas anodine. En effet, lorsque ces micro-organismes du sol quittent le biofilm, ils transportent à l'extrémité de leur pédoncule des cellules de l'oomycète pathogène, contribuant ainsi, de façon fortuite, à sa dissémination. Des études complémentaires sont nécessaires pour savoir si ce comportement se produit de la même manière dans le milieu naturel.



Agaricus bisporus.



Conidiophores de *Botrytis cinerea* portant des conidies ou spores dont la structure caractéristique est en arbuste.

Le biofilm booste l'efficacité de l'agent de biocontrôle

En matière de biocontrôle, la filière des champignons de Paris (*Agaricus bisporus*) fait figure d'élève modèle. En effet, 80% des cultures sont protégées par du biocontrôle. Une bactérie, *Bacillus velezensis*, est notamment plébiscitée par une majorité de producteurs, qui l'utilisent depuis une dizaine d'années pour lutter contre la moisissure verte (*Trichoderma aggressivum*). Pour les chercheurs d'INRAE, cette étonnante efficacité pourrait être liée à la formation d'un biofilm à la surface du compost, constitué de bactéries *B. velezensis* reliées entre elles au sein d'une matrice protectrice. Cette organisation en communauté microbienne, très commune parmi les micro-organismes, protège les bactéries des agressions extérieures. Pour l'agent de biocontrôle, cela se traduit par une meilleure résistance aux variations d'humidité mais aussi aux antimicrobiens et toxines diverses, présents dans le milieu. Le biofilm confère en plus un avantage compétitif dans la colonisation de l'environnement et une efficacité accrue de ses substances antimicrobiennes, entravant de fait le développement d'autres micro-organismes. Les chercheurs ont ainsi constaté qu'en l'absence de bioprotection des cultures par l'agent de biocontrôle *B. velezensis*, la multiplication du bioagresseur *T. aggressivum* peut réduire de moitié le rendement en champignons de Paris (aucun champignon ne se développe dans les zones touchées). A l'inverse, lorsque *B. velezensis* est utilisée, le bioagresseur ne parvient pas à se développer en présence du biofilm composé par les précieuses bactéries. Et tout cela

sans aucune conséquence pour le champignon de Paris. Et pour le compost? Eh bien là encore, une étude en cours semble montrer que la présence de la souche bactérienne ne modifie pas les grands profils de diversité du compost et leur dynamique. C'est important car une fois les champignons récoltés, le compost peut être réutilisé pour la fertilisation des cultures de sol. Les chercheurs poursuivent leurs travaux, avec comme objectif ultime, la formulation d'agents de biocontrôle voire de cocktails de souches, sous forme de biofilms, pour améliorer leur résistance et accélérer leur implantation.





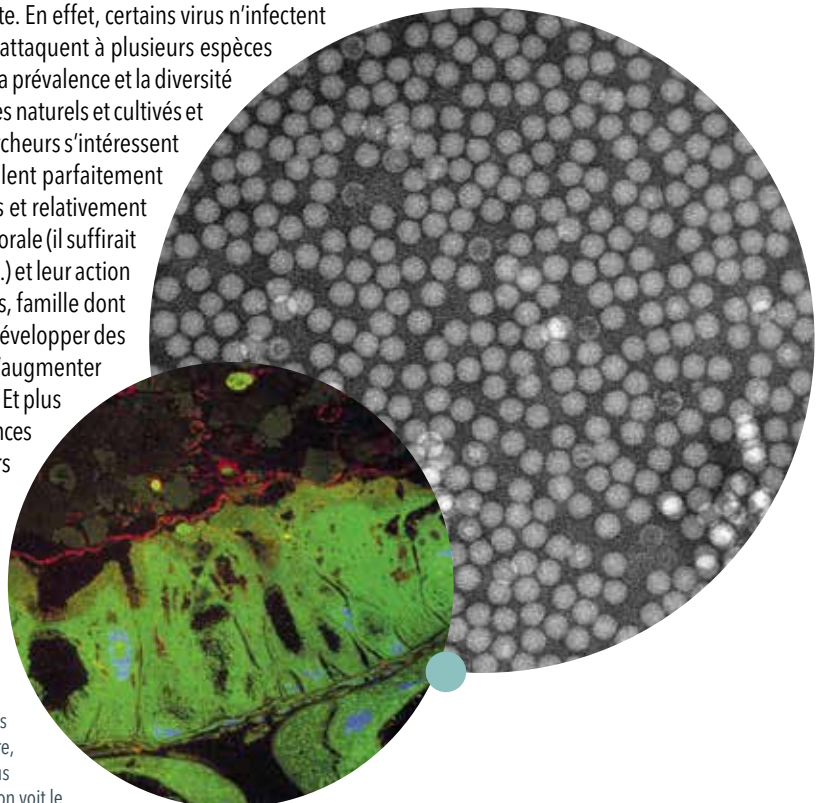
Un virus pour lutter contre le carpocapse

Les pommes sont en France les fruits qui font l'objet du plus grand nombre de traitements à base de pesticides chimiques, notamment pour lutter contre le très agressif carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*). Pour autant, des solutions alternatives existent. Adoptées depuis longtemps par les agriculteurs bio, elles attirent un nombre croissant de producteurs en agriculture conventionnelle, notamment en raison de leur innocuité sur la santé humaine autorisant des traitements proches de la récolte. Parmi ces agents de biocontrôle, la carpovirusine fait figure de pionnier. Son élaboration par INRAE et la société Calliope a débuté dès les années 80, et le produit est commercialisé depuis 1998. Développé à partir du virus de la granulose du carpocapse, un pathogène spécifique de l'insecte, la carpovirusine est pulvérisée sur les pommiers et contamine les larves qui la consomment. Le virus se réplique alors dans l'organisme, provoquant l'arrêt de l'alimentation, et la mort en quelques jours. En agriculture bio, la carpovirusine est utilisée en association avec d'autres méthodes de biocontrôle, telles que la confusion sexuelle des papillons mâles, ou l'utilisation de filets « type » moustiquaire appelés filets Alt'carpo.

Les densovirus, petits, mais costauds

Les virus pathogènes sont employés avec succès depuis plusieurs années dans le cadre du biocontrôle. La carpovirusine en donne un bon exemple. Cependant, malgré une efficacité avérée, leur usage demeure encore confidentiel puisqu'ils ne représentent qu'environ 4 % des produits de biocontrôle. Une situation qui pourrait rapidement changer, tant ces minuscules micro-organismes constituent de précieux auxiliaires. Prenez les densovirus, par exemple. Ils comptent parmi les virus les plus petits et les plus simples. Mais qu'ils pénètrent la larve d'un lépidoptère phytophage, et ils la tuent en quelques jours. De la frappe chirurgicale, en quelque sorte. Afin d'exploiter au mieux ces micro-organismes, les chercheurs d'INRAE s'efforcent d'observer les mécanismes d'interactions entre le virus et son hôte et de comprendre ce qui détermine leur spécificité d'hôte. En effet, certains virus n'infectent qu'une espèce bien précise tandis que d'autres s'attaquent à plusieurs espèces d'un même genre. Ils tentent aussi de déterminer la prévalence et la diversité des virus chez les insectes associés aux écosystèmes naturels et cultivés et de mesurer la proportion de densovirus. Si les chercheurs s'intéressent particulièrement à ces derniers, c'est qu'ils semblent parfaitement adaptés pour servir d'agents de biocontrôle. Petits et relativement aisés à produire, ils contaminent les larves par voie orale (il suffirait donc de les pulvériser sur les feuilles ou les troncs...) et leur action pathogène est comparable à celles des baculovirus, famille dont fait partie le virus de la granulose du carpocapse. Développer des produits à base de densovirus permettrait donc d'augmenter l'arsenal des solutions insecticides d'origine virale. Et plus cet arsenal sera diversifié, plus l'apparition de résistances chez les insectes cibles sera limitée. Après plusieurs années de recherche, INRAE en collaboration avec la société Bioline AgroSciences, a sélectionné une souche de densovirus prometteuse et s'apprête à entrer dans une nouvelle phase de son développement en tant qu'agent de biocontrôle.

Densovirus pathogène pour les chenilles du ravageur de maïs *Spodoptera frugiperda*. Ces virus sont parmi les plus petits virus animaux connus (une vingtaine de nanomètres). Dans la nature, les chenilles s'infectent à partir de feuilles contaminées. Le virus traversera ensuite l'intestin de l'insecte (photo en couleur ou l'on voit le virus en rouge accroché aux cellules de l'intestin en vert quelques minutes après son ingestion) pour se propager et se multiplier dans de nombreux tissus, notamment le système respiratoire et l'épiderme. Entre autres symptômes, l'infection provoquera un arrêt du développement et une asphyxie des chenilles, entraînant leur mort en quelques jours, ce temps étant fonction du stade larvaire infecté et de la dose virale ingérée.



Un virus qui castagne



Le chancre du châtaignier est une maladie causée par un champignon pathogène (*Cryphonectria parasitica*), qui est listé par l'Union internationale pour la conservation de la nature parmi les 100 espèces invasives les plus dommageables au monde. Les nécroses de l'écorce et du bois qu'il provoque entraînent un dysfonctionnement hydrique qui cause la mort des branches puis des arbres.

Originnaire d'Asie, *C. parasitica* a été introduit accidentellement en Europe au début du XX^{ème} siècle et son impact a été très sévère après-guerre dans les châtaigneraies européennes. La maladie est toujours en extension dans le Nord de la France et en Europe. En 1964, une équipe INRAE observe des guérisons spontanées de nécroses et en isole des souches de *C. parasitica* présentant un pouvoir pathogène réduit.

Qualifiées d'hypovirulentes, ces souches sont infectées par un virus (*Cryphonectria hypovirus 1*, CHV1), également originaire d'Asie, qui diminue leur agressivité et leur dispersion. Quelques années plus tard, une méthode de biocontrôle contre le chancre du châtaignier est proposée en France. Elle consiste à inoculer des souches hypovirulentes aux arbres malades afin que ces souches transmettent leur virus aux souches naturellement présentes, permettant ainsi la guérison des arbres. Après 20 ans d'expérience en vergers, un programme de recherche sur le chancre du châtaignier a été initié en 1995 par INRAE à Bordeaux. Réunissant professionnels et acteurs de la recherche-développement, il a permis de redéfinir les meilleurs mélanges de souches hypovirulentes à utiliser. Une nouvelle méthode d'application du produit a également été conçue et les différents types viraux et modes de transmission du CHV ont été caractérisés. Désormais, même si l'incidence de la maladie est forte dans le Sud de la France, elle ne cause plus de dégâts majeurs en présence des souches hypovirulentes, ce qui témoigne de la réussite de cette méthode de biocontrôle.

Après 20 ans d'expérience en vergers, un programme de recherche sur le chancre du châtaignier a été initié en 1995 par INRAE à Bordeaux. Réunissant professionnels et acteurs de la recherche-développement, il a permis de redéfinir les meilleurs mélanges de souches hypovirulentes à utiliser. Une nouvelle méthode d'application du produit a également été conçue et les différents types viraux et modes de transmission du CHV ont été caractérisés. Désormais, même si l'incidence de la maladie est forte dans le Sud de la France, elle ne cause plus de dégâts majeurs en présence des souches hypovirulentes, ce qui témoigne de la réussite de cette méthode de biocontrôle.



Souches de *Cryphonectria parasitica* non infectée (à gauche) et infectée (à droite) par le virus CHV1.



04.

Production de racines riches en acides dicaféoylquiniques (liseron d'eau, *Ipomea aquatica*).



Les substances naturelles bénéfiques

Qu'elles soient d'origine animale, végétale ou minérale, les substances naturelles ont vocation à se développer dans le cadre du biocontrôle, afin de se substituer, partiellement ou totalement, aux produits phytosanitaires.



Puceron *Myzus Persicae*.

Au cœur de la patate douce

Les pucerons, minuscules insectes phytophages, sont une plaie pour les agriculteurs. Non contents de dévorer les jeunes feuilles, ils véhiculent aussi un grand nombre de virus phytopathogènes et font preuve d'une grande résistance à l'égard des pesticides. Mais peut-être plus pour longtemps. Des chercheurs d'INRAE, qui étudient les mécanismes de résistance du pêcher face au puceron vert, ont mis en évidence des molécules (acides dicaféoylquiniques) si toxiques qu'en laboratoire, elles se sont avérées fatales pour toutes les espèces de pucerons testées. Seul problème, ces molécules sont très difficiles à isoler à partir du pêcher. Les scientifiques se sont donc mis en quête d'une autre source d'approvisionnement et c'est finalement dans la patate douce qu'ils l'ont déniché, en très grande quantité. A la suite de cette découverte, INRAE a déposé deux brevets. Le premier sur la production de ces molécules à partir des racines de la patate douce, le second sur ses propriétés aphicides (anti pucerons) et fongicides. Cette démarche s'inscrit dans le cadre du projet DiCaBio, associant des partenaires académiques et la société SBM Life Science, qui vise à développer des solutions de biocontrôle basées sur les acides dicaféoylquiniques. Prochaines étapes, étudier la capacité d'adaptation des pucerons à ces molécules en condition de culture et en mesurer l'impact sur l'environnement, notamment sur les abeilles. Ces molécules ne présentent pas de danger pour l'Homme. Elles sont au contraire réputées pour leurs propriétés antioxydantes.

Une sélection impitoyable

Le projet Lipocontrol s'attache à isoler et purifier des lipopeptides à partir de souches de bactéries du genre *Pseudomonas*. Ce genre bactérien est en effet connu pour être une importante source de ces molécules. Si les lipopeptides intéressent tant les scientifiques, c'est qu'ils possèdent des propriétés, notamment antibiotiques, qui peuvent inhiber le développement d'un agent pathogène. En outre, les lipopeptides peuvent induire chez la plante ciblée, des mécanismes de défense qui la rendent moins sensible aux bioagresseurs. Après avoir testé près de 800 souches de *Pseudomonas*, les chercheurs d'INRAE et de l'université de Lille ont isolé une demi-douzaine de lipopeptides candidats très prometteurs, dont l'efficacité va maintenant être vérifiée sur des plantes en pot. L'objectif, à terme, consiste à produire un bio-fongicide efficace contre une majorité de champignons ravageurs des cultures, tels que l'oïdium ou la pourriture grise.



Mise en évidence de la microflore bactérienne épiphyte.



Et contre les mauvaises herbes, on fait quoi ?

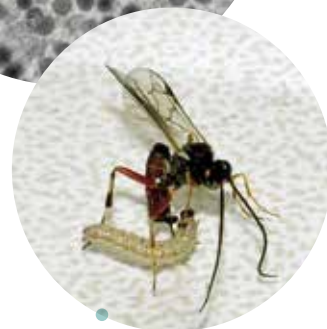
Depuis l'interdiction du glyphosate, nombre d'acteurs dépoussièrent leurs binettes et autres sarcloirs. Et si le biocontrôle pouvait les aider ? Actuellement, peu de bioherbicides sont disponibles sur le marché mais des projets de recherche visent à développer une nouvelle génération de produits plus respectueux de l'environnement. Les équipes INRAE contribuent au côté de leurs partenaires à étudier le potentiel de molécules naturelles issues de champignons et de plantes pour proposer des bioherbicides basés sur de nouveaux modes d'action. Côté champignon, de nombreux produits naturels bioactifs sont des métabolites secondaires produits par les champignons. Certains, tels que la pénicilline ou la céphalosporine, sont précieux dans le domaine médical. Les champignons pathogènes de plantes sont aussi capables de produire des métabolites secondaires qui pourraient être utilisés comme bioherbicides. C'est l'objectif du projet HerbiFun, porté par la société De Sangosse et impliquant notamment INRAE. Côté plante, le projet HerbiScan, porté par la société Plant Advanced Technologies et associant des équipes INRAE, vise à « scanner » différents extraits végétaux pour y puiser des molécules à activité herbicide. Les mauvaises herbes n'ont qu'à bien se tenir !

Comprendre les interactions hôte-parasitoïde pour ouvrir de nouvelles pistes d'innovation

Depuis plusieurs années, les chercheurs s'attellent à une tâche immense : décrypter les mécanismes moléculaires qui régissent les interactions hôte-parasitoïde. Ils étudient plus spécifiquement le comportement des espèces *Ichneumonides*, tels *Hyposoter didymator* et *Venturia canescens*. Les larves de ces petits insectes hyménoptères se développent à l'intérieur des chenilles qui sont d'importants ravageurs des cultures. Au cours de leur évolution, ces parasitoïdes ont développé une stratégie d'infestation étonnante. La femelle injecte dans la chenille hôte, non seulement l'œuf, mais également des particules virales symbiotiques qu'elle produit et stocke uniquement dans ses ovaires. Pourquoi symbiotiques ? Eh bien parce qu'elles sont indispensables au développement du parasitoïde. D'une part, elles provoquent une réduction de l'alimentation et de la croissance de la chenille, d'autre part, elles inhibent ses réponses immunitaires. Dévorée peu à peu de l'intérieur, la chenille finit par mourir et la larve de l'hyménoptère s'extrait alors pour tisser son cocon et se transformer en nymphe. Les chercheurs d'INRAE ont constaté que si l'œuf est injecté seul, il meurt dans 95 % des cas. A l'inverse, si l'on injecte uniquement les particules virales, la chenille montre les mêmes signes d'infestation que si elle hébergeait le parasitoïde. Les scientifiques s'efforcent à présent de caractériser la variabilité des facteurs de virulence pour tenter d'identifier quels sont les parasitoïdes les mieux adaptés à la lutte contre une espèce donnée de ravageur. Autre piste explorée, l'identification de molécules de virulence qui pourraient faire l'objet d'une formulation en laboratoire, afin d'être utilisées dans le cadre du biocontrôle. Mais les chercheurs voient encore plus loin. Leur rêve : comprendre comment les particules virales se forment dans l'ovaire du parasitoïde. Ils pourraient alors envisager des expérimentations génétiques *in vitro*, de manière à obtenir des cellules capables de produire des particules virales intégrant des gènes produisant des molécules potentiellement intéressantes pour des applications de biocontrôle.



Virus d'*Hyposoter didymator*.

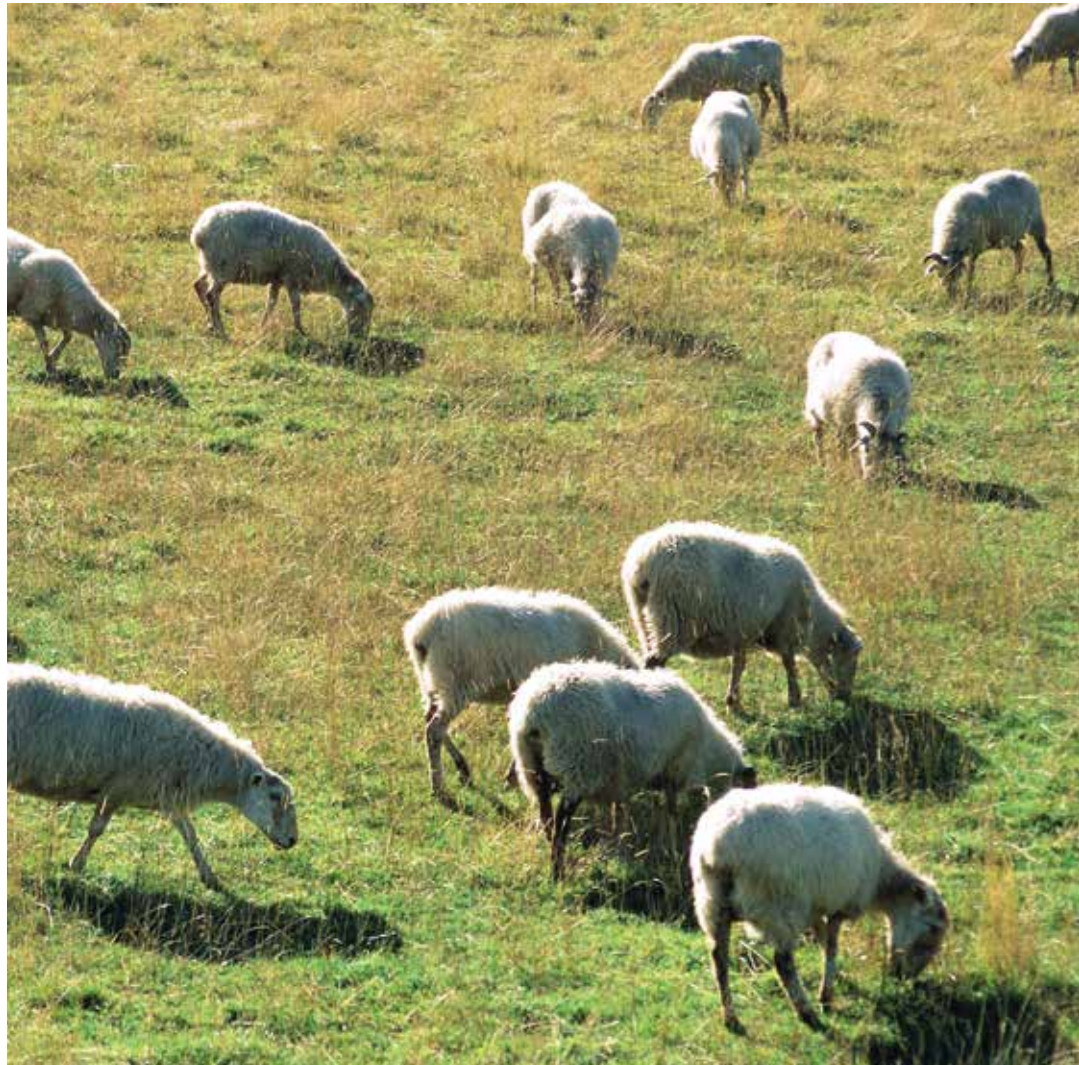


Femelle d'*Hyposoter didymator* parasitant des larves de chenilles de noctuelle *Spodoptera frugiperda*.



Des plantes à tannins pour lutter contre des vers parasites des chèvres et moutons

C'est un dommage collatéral inéluctable du pâturage ! Lorsque les chèvres ou les moutons exploitent l'herbe, ils sont confrontés à un risque sanitaire majeur en ingérant des larves de nématodes parasites qui vont s'installer dans leur tube digestif et entraîner des pertes zootechniques (retards de croissance ; chutes de production de lait) voire des signes cliniques ou des mortalités. La lutte contre ces bioagresseurs parasites est d'autant plus difficile qu'ils résistent désormais à la plupart des molécules chimiques anthelminthiques (vermifuges) commercialisées. Aujourd'hui pourtant, de nouvelles solutions se profilent, basées sur l'utilisation des tannins condensés. Ces substances naturelles (polyphénols) sont présentes dans certaines légumineuses, à commencer par le sainfoin, et leur confèrent des propriétés sanitaires contre les parasites. Elles permettent aussi de réduire les gaz à effet de serre émis par les ruminants. De plus, le sainfoin fixe l'azote dans les sols, ce qui contribue à limiter l'emploi d'engrais azotés. Et c'est aussi une plante mellifère. Bref, une vraie plante « star » de l'agroécologie ! Par ailleurs, une autre source potentielle de tannins condensés a également été identifiée. Il s'agit de divers coproduits agro-industriels, comme par exemple les « pellicules » qui entourent l'amande des châtaignes, noisettes et autres noix. Ces matières, pouvant représenter jusqu'à 20% du coût d'achat, sont considérées comme des déchets alors qu'ils pourraient être valorisés. C'est l'un des objectifs du projet Combitan, financé par l'institut Carnot France Futur Elevage. Réunissant deux laboratoires de recherche INRAE, des universités européennes et des partenaires privés, il vise à développer de nouveaux aliments ou compléments alimentaires enrichis en tannins condensés, par exemple des granulés déshydratés de sainfoin aisément stockables et manipulables.



Cristal protéique de *Bacillus thuringiensis*, bactérie en fin de sporulation.

Les toxines de *Bacillus thuringiensis*

Bacillus thuringiensis (*Bt*) est le micro-organisme star parmi les agents de biocontrôle. On l'utilise en France depuis les années 1930 ! Il existe plus de 70 souches différentes de *Bt* dont certaines ont un champ d'action très vaste. Trop, d'ailleurs pour être utilisées sans danger. Seules trois souches sont majoritairement employées aujourd'hui, dont *Bt kurstaki*, la plus répandue. Il faut dire que cette souche produit des toxines spécifiques qui ne tuent que les larves des lépidoptères, principaux ravageurs des plantes cultivées. Elle est aussi efficace pour lutter contre les chenilles processionnaires du pin et du chêne.



La stimulation de défenses des plantes, un mode d'action particulier



Les agents et substances de biocontrôle ont divers modes d'action. Ils peuvent par exemple s'attaquer aux bioagresseurs, entrer en compétition avec eux pour la ressource, ou protéger la plante de leurs effets néfastes. Mais ils peuvent aussi agir directement sur la plante et l'amener à se défendre face aux bioagresseurs. Ils ont alors une action de stimulation de défense des plantes (SDP). Les plantes ont un système immunitaire, c'est-à-dire qu'elles disposent de mécanismes de résistance qui peuvent la protéger des maladies. Elles sont ainsi capables de détecter des molécules présentes à la surface des agents pathogènes ou excrétées par ces derniers, et que l'on appelle des éliciteurs. C'est le fait de reconnaître ces éliciteurs qui déclenche les défenses naturelles des plantes. Mais parfois, elles ne mettent pas en place ces mécanismes, ou les mettent en place trop tardivement, parce que l'agresseur s'est adapté pour passer inaperçu. Les SDP ont pour objectif de pallier cette défaillance. Ils stimulent le système immunitaire de la plante et lui confèrent une résistance accrue face à des maladies, comparé à une plante non traitée. Ici, l'objectif n'est pas d'éliminer le bioagresseur, mais de forcer la plante à activer ses propres armes pour s'en charger elle-même. Les SDP constituent l'un des leviers d'avenir du biocontrôle.

Vérifier rapidement l'efficacité d'un SDP

Pour vérifier qu'un microorganisme ou qu'une substance a une activité de stimulation de défense des plantes (c'est-à-dire une réelle efficacité à booster le système immunitaire d'une plante), un outil nommé qPFD (Puce à Faible Densité quantitative) a été développé et breveté par INRAE. Cet outil, actuellement disponible sur plusieurs cultures (pomme, blé, vigne, tomate, pomme de terre, carotte) permet de tester un grand nombre de composés en mesurant le niveau d'activation de 28 marqueurs de défense d'une plante après traitement. L'outil permet ainsi de sélectionner rapidement en laboratoire les composés les plus prometteurs, et d'écarter les moins efficaces, ce qui limite les expérimentations au champ, longues et coûteuses.

Sur vigne, deux puces ont été développées pour suivre spécifiquement 96 gènes marqueurs de la défense et 96 gènes marqueurs de l'état physiologique de la plante. Utilisées en complément l'une de l'autre, ces deux puces permettent d'explorer et de comprendre le mode d'action de stimulateurs de défenses et de biostimulants afin notamment d'évaluer l'intérêt de combiner ou d'alterner ces stratégies au vignoble. Ces deux puces sont disponibles sur la plateforme Biocontrol2Grape [voir Chapitre 5].



Jeune semis de pommier traité avec un SDP candidat et prélèvement de disques foliaires avant analyse qPFD.





05.

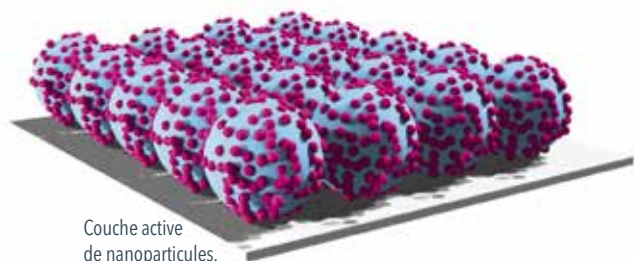


Déployer le biocontrôle à large échelle, un défi pour la recherche

Développer des solutions, c'est bien, les utiliser c'est mieux ! Les utiliser à bon escient et à large échelle, c'est encore mieux ! Rendre les organismes plus aptes à se disperser au champ, améliorer la résilience des substances face aux aléas du terrain, développer des outils pour déployer le biocontrôle au bon endroit et au bon moment, définir des façons de cultiver mobilisant davantage la prévention et laissant plus de place au biocontrôle, tels sont les défis que relèvent les équipes de recherche actuellement.

La confusion sexuelle, un énorme potentiel et un défi à déployer

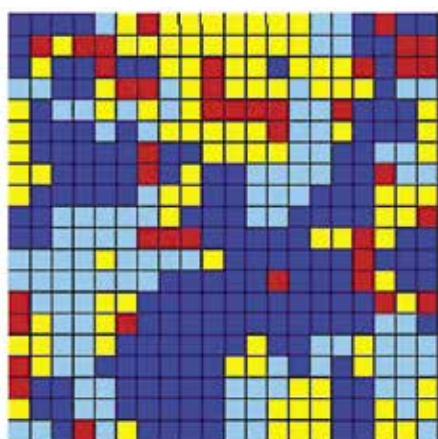
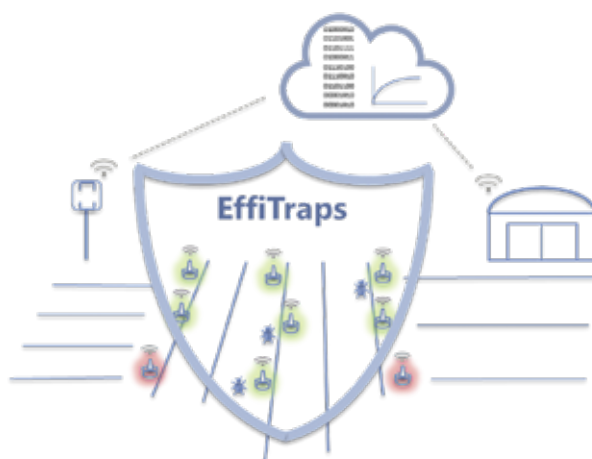
La confusion sexuelle est de plus en plus appliquée, sur près de 80.000 ha de vigne et 50.000 ha de vergers, pour contrôler des ravageurs tels que l'eudémis, la cochylys de la vigne ou encore le carpocapse de la pomme. Pour autant, des freins subsistent et entravent son développement. Et le premier est d'ordre économique. Pour protéger un hectare de vigne par exemple, ce sont 500 diffuseurs qu'il faut suspendre un par un à la main dans les rangs. Coût de l'opération : de 200 à 250 euros par an et par hectare. C'est probablement trop pour envisager un déploiement à très large échelle. Mais cela va changer. L'efficacité de cette technique dépend de la concentration en phéromone de synthèse dans l'air et de l'homogénéité spatiale du nuage odorant. Or, paradoxalement, aucun outil de mesure simple et bon marché n'est au point pour mesurer la concentration en phéromone dans l'air et ajuster les doses et les stratégies de diffusion en conséquence. INRAE s'est associé au CNRS et à l'Université de Bordeaux pour apporter un outil de mesure afin que l'agriculteur puisse s'assurer du bon fonctionnement des diffuseurs qu'il utilise et prévoir la propagation des nuages de phéromones (ou de différentes odeurs). Le dispositif en développement, basé sur des capteurs combinant plusieurs technologies dont une couche active de nanoparticules, présentera plusieurs avantages : un coût plus faible, et la possibilité de l'adapter rapidement à d'autres systèmes d'odeurs biologiques. Actuellement ce projet innovant est en phase de mise au point, des premiers essais en parcelles pratiquant la confusion sexuelle seront réalisés à l'été 2020.



Couche active de nanoparticules.

Des pièges améliorés et connectés

La start-up Agriodor développe le piégeage de la bruche de la féverole au moyen de mélanges attractifs mimant les odeurs de différents organes de la féverole. Problème : ces mélanges doivent être utilisés à des moments différents en fonction de l'état de la culture et du stade de développement de la bruche. Comment éviter que le déploiement de cette méthode ne soit pénalisé par une lourdeur de gestion au champ ? Pour répondre à cette question, les équipes d'INRAE et d'Agriodor collaborent dans le projet EffiTraps qui vise à révolutionner la façon d'utiliser les mélanges d'odeur au champ. L'innovation visée utilisera des diffuseurs actifs d'odeurs, commandés à distance, là où les technologies précédentes consistaient en une diffusion passive continue nécessitant plus de quantités d'odeurs. D'autre part, la diffusion active sera synchronisée entre les pièges disposés au champ et s'appuiera sur les dernières avancées en matière de micro-fluidique pour délivrer un signal olfactif optimisé en fonction des conditions microclimatiques. Grâce à une plus faible consommation de substances, à une baisse du nombre de pièges nécessaires et à une limitation des interventions au terrain, cette nouvelle technique de piégeage sera accessible au plus grand nombre. Si les résultats seront d'abord spécifiques à la lutte contre la bruche de la féverole, ils pourront par la suite être généralisés à d'autres kairomones ou phéromones.



MULTILAND : générateur de paysages aléatoires. Il permet de contrôler les proportions et le niveau de fragmentation des régions qui composent le paysage.

Le projet Peerless

Quels sont les effets de l'organisation du paysage et des pratiques agricoles sur les auxiliaires de culture ? Voilà l'une des questions auxquelles s'efforcent de répondre les chercheurs d'INRAE. Dans le cadre du projet Peerless, ils ont élaboré un modèle destiné à évaluer la manière dont les ravageurs et leurs prédateurs se déplacent dans l'espace, se reproduisent et interagissent, en fonction de l'environnement. Calibré à partir de données recueillies sur le terrain, le modèle permet de tester d'innombrables scénarios d'aménagement du paysage et d'identifier les configurations et les agencements les plus propices au développement et à la dissémination des auxiliaires. Et ceux qui, au contraire, constituent des obstacles à leur propagation.



Du bon usage des auxiliaires

Quelles sont les chances de succès d'introduction et d'expansion d'un auxiliaire, dans un habitat donné ? Combien d'auxiliaires faut-il lâcher ? C'est à ces questions que s'efforcent de répondre les chercheurs de l'INRAE. Un travail de longue haleine, qui se déroule en trois phases. Les scientifiques commencent par développer des modèles mathématiques destinés à observer le comportement d'auxiliaires lâchés, qu'il s'agisse de micro-guêpes parasitoïdes, d'insectes ou d'acariens prédateurs. Ils examinent notamment la façon dont les auxiliaires se dispersent dans l'espace et dans le temps, en fonction de la structuration de l'environnement, des sources de nourriture, ou encore des abris et sites de ponte artificiels mis à leur disposition dans le but de favoriser leur conservation. Les modèles tiennent aussi compte des phénomènes négatifs liés à la densité : l'efficacité individuelle des prédateurs baisse avec leur nombre. En clair, trop d'auxiliaires présents en même temps dans l'environnement, c'est du gâchis ! Les prédictions générales issues des modèles sont ensuite affinées en laboratoire, avec de vrais auxiliaires cette fois, mais dans des paysages artificiels composés de cages, de tubes et de tuyaux. Les chercheurs observent ainsi leur comportement sur plusieurs générations : comment et à quelle vitesse se déplacent-ils, comment se comportent-ils devant des obstacles... Enfin, les prédictions obtenues en laboratoire sont testées en milieu naturel. L'objectif consiste notamment à mesurer la façon dont l'organisme colonise le paysage agricole, en fonction des éléments qui s'y trouvent : haies, présence de produits phytosanitaires, types de culture... Des captures réalisées à intervalles réguliers dans l'espace et le temps permettent de suivre l'évolution spatiale et démographique de la population lâchée. Bref, de comprendre à quoi ressemble un paysage agricole du point de vue de l'auxiliaire. A l'issue des expérimentations, les chercheurs vont concevoir une plateforme de simulation destinée au grand public, et particulièrement aux acteurs du biocontrôle, afin de leur fournir des conseils et recommandations sur le bon usage des auxiliaires, garantissant leur survie et leur expansion.



Capsules utilisées sur le terrain pour le déploiement des trichogrammes. Ces derniers émergent à l'intérieur des capsules puis sortent par les orifices. Ils se déplacent ensuite vers le maïs pour y trouver les œufs du ravageur qu'ils neutralisent en les parasitant. (Source : Bioline Agrosociences)

Découpler l'utilisation des micro-guêpes trichogrammes

Un auxiliaire qui va plus loin et qui trouve mieux ses cibles, c'est plus facile à utiliser ! Ce n'est cependant pas facile à trouver. Comment distinguer un auxiliaire qui ira loin ? Comment éviter qu'il ne s'adapte aux conditions industrielles et se perde ensuite dans les champs ? Les équipes INRAE et Bioline AgroSciences travaillent sur ces questions depuis le lancement du projet COLBICS (2013-2016), en s'intéressant aux possibilités d'amélioration des trichogrammes. Des essais ont notamment été mis en place dans des parcelles de maïs en y lâchant plusieurs souches aux caractéristiques différentes. Un protocole a été développé pour comparer les performances de ces souches et identifier les plus prometteuses. Le jeu en valait la chandelle, les nouvelles souches ainsi sélectionnées présentent une performance accrue d'environ 30% : un gain d'efficacité facilement déployable dans les champs pour une protection accrue ! Et les recherches ne s'arrêtent pas là. Pour guider le choix

des meilleures espèces et des meilleures souches parmi ces espèces, le projet Trichobio (lancé par INRAE, l'Université Côte d'Azur et Bioline AgroSciences) cherche à identifier des caractéristiques qui soient facilement mesurables au laboratoire qui permettent de prédire les performances des trichogrammes au moment de leur production ou lors de leur lâcher sur le terrain. Pour ce faire, les chercheurs vont jusqu'à s'intéresser à la... personnalité de ces micro-guêpes d'un demi-millimètre de long. Objectif : définir s'il est possible de reconnaître des trichogrammes plus explorateurs, plus actifs ou plus audacieux ; et si ces traits de caractère leur permettent d'être plus performants. Dans ces mêmes projets, des équipes de recherche en sciences humaines et sociales travaillent également sur des scénarios d'organisation des entreprises et des acteurs du territoire pour faciliter la généralisation de l'utilisation des trichogrammes.

Combiner les stratégies *via* des agents doubles : l'entomovectoring

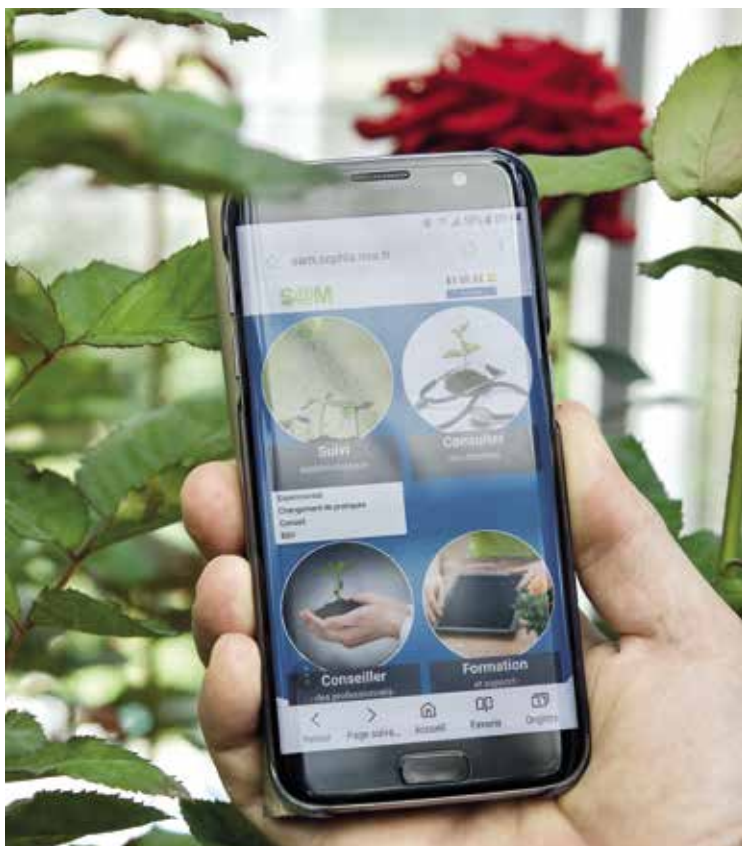
Une façon de favoriser l'usage du biocontrôle est de le rendre multifonctions. L'entomovectoring consiste à véhiculer grâce à des insectes bénéfiques des molécules et/ou des micro-organismes bénéfiques et à les délivrer à la plante au moment où l'insecte vecteur s'y déplace. C'est l'objectif sur lequel se concentrent les équipes INRAE porteuses du projet ENTOMOVECTOR. Le « véhicule » étudié dans ce projet est la punaise prédatrice *Macrolophus pygmeus*, utilisée en tant qu'agent de biocontrôle depuis plus de 20 ans. Les équipes s'intéressent aux capacités de *M. pygmeus* à véhiculer des substances naturelles stimulant les défenses des plantes et des microorganismes de biocontrôle.



● *Macrolophus pygmeus*.

Associer biocontrôle et autres méthodes et pratiques

Leurs cultures étant exposées à la fois aux bioagresseurs et aux aléas climatiques, les agriculteurs doivent sans cesse jongler entre différents leviers à activer pour limiter l'impact sur leurs productions. Etablir un plan de gestion de la parcelle combinant entre elles des pratiques agro-écologiques relève parfois du casse-tête! Pour accompagner les agriculteurs, les équipes INRAE s'associent aux fournisseurs de solutions qui travaillent à intégrer leurs stratégies de biocontrôle en proposant des évolutions des pratiques agricoles. C'est notamment le cas du projet BIODERA, porté par le Centre Mondial de l'Innovation (groupe Roullier). Centré sur le développement de nouveaux produits de biocontrôle à base d'extraits végétaux (des jus de racines notamment !) contre les nématodes parasites de plantes, BIODERA vise également à travailler sur la compatibilité entre ces stratégies de biocontrôle et les pratiques de fertilisation, afin de réduire le nombre de passage d'engins sur les parcelles et donc de limiter la consommation d'énergie. Autre exemple, le projet SOLSTICE. Porté par la société BELCHIM CROP PROTECTION France, il regroupe des partenaires publics et privés allant de la recherche fondamentale jusqu'à la distribution des produits et aux utilisateurs finaux. Ses objectifs ? Développer des produits de biocontrôle contre les maladies de la vigne, des plantes ornementales et des cultures légumières et retravailler les modes d'application des produits pour optimiser leur déploiement tout en limitant la quantité de produit à appliquer.



S@M, l'allié numérique des horticulteurs

S@M est un outil d'aide à la décision destiné aux professionnels de l'horticulture qui privilégient l'emploi d'agents de biocontrôle pour assurer la bonne santé des plantes. Conçu par INRAE pour être à la fois robuste, fiable et simple d'utilisation, S@M se présente sous la forme d'une interface Web, utilisable sur le terrain avec une tablette ou un smartphone. Il permet à l'exploitant ou au conseiller de collecter, stocker et diffuser l'ensemble des données biologiques et plus globalement de production d'un agro-écosystème. En échange, l'outil permet un suivi précis et en temps réel de l'état sanitaire de chaque parcelle de l'exploitation et fournit des conseils personnalisés pour prendre les meilleures décisions de gestion de la culture, telles que l'utilisation de produits de biocontrôle ou de stratégies de lutte biologique par conservation. Utilisé dans un premier temps pour la culture des rosiers, l'outil est maintenant disponible pour la tomate.



Durabilité du biocontrôle

Déployer à large échelle, c'est aussi s'assurer que les nouvelles solutions sont durables. Durablement efficaces tout d'abord, mais également durables du point de vue de leur impact sur l'environnement et la santé.



dossier de
PRESSE

Les champignons se rebellent

Les mécanismes d'action d'un agent de biocontrôle sont si complexes, qu'il est peu probable qu'ils puissent être contournés par un agent pathogène. Longtemps, cette idée a prévalu parmi les acteurs engagés dans le biocontrôle. Mais il y a une quinzaine d'années, les chercheurs ont quand même voulu s'en assurer. Ils ont prélevé dans la nature diverses souches de *Botrytis cinerea*, l'agent responsable de la pourriture grise. Après avoir confronté des générations successives du champignon à une molécule aux propriétés antibiotiques produite par une souche de *Pseudomonas*, ils se sont aperçus que certaines souches de *B. cinerea* développaient une résistance. D'autres processus de contournement ont été observés, notamment chez les insectes confrontés à *Bt*. Une sacrée guigne car la création d'un nouvel agent de biocontrôle est un processus très long et coûteux. Alors mieux vaut s'assurer qu'il sera efficace le plus longtemps possible ! C'est pour cela qu'il convient de les employer avec les mêmes précautions qu'on le fait aujourd'hui pour les produits chimiques : alterner les molécules et éviter les traitements successifs. Et désormais, les chercheurs contrôlent la durabilité des agents de biocontrôle, notamment en les soumettant à des souches différentes du même bioagresseur ciblé.



Quand le carpocapse fait de la résistance

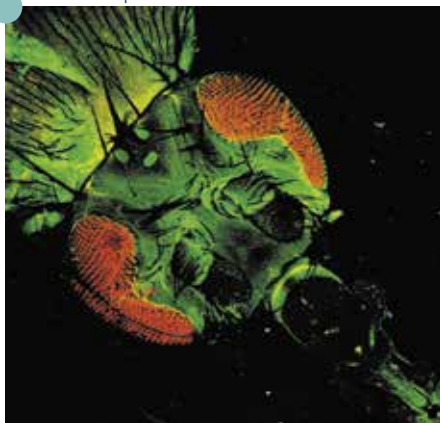
Faute d'autre solution naturelle disponible, la carpovirusine a été utilisée sans modération dans les vergers conduits en agriculture biologique. Après huit ans d'utilisation à une fréquence pouvant atteindre 12 traitements par an pour un même verger, les premiers cas de résistance sont apparus en 2005, dans le sud-est de la France et en Allemagne. Les insectes s'avéraient ainsi capables de survivre à des doses virales 13 000 fois supérieures à celles normalement suffisantes pour les tuer ! Immédiatement, des projets scientifiques ont été lancés au niveau national et européen. D'abord pour comprendre la cause de la résistance et sa fréquence, puis pour tenter d'identifier de nouveaux isolats viraux capables de tuer les insectes résistants et enfin créer un nouveau produit. Ces recherches ont porté leur fruit car désormais, trois variantes du virus sont disponibles dont deux efficaces contre les insectes résistants. Mais les chercheurs d'INRAE explorent aussi d'autres pistes. Ils comptent ainsi sur la capacité du virus à évoluer naturellement pour s'adapter aux mutations de l'insecte et contourner les résistances qu'il a développées. Cette coévolution permettrait en effet de conserver l'efficacité des virus sur les populations sauvages de carpocapses, rendant l'identification de nouveaux isolats moins urgente, sinon inutile. En attendant, il est primordial d'alterner l'utilisation des différents bio-insecticides au cours d'une année, de manière à réduire la pression de sélection sur ce bioagresseur et éviter ainsi l'émergence de nouvelles résistances.



Quand le climat s'en mêle

Avec le changement climatique, on assiste à un accroissement des épisodes de stress hydrique qui affectent non seulement les plantes, mais aussi les organismes vivants et notamment les ravageurs et leurs prédateurs. On constate, par exemple, que des populations de pucerons peuvent se développer plus rapidement sur des peupliers subissant une carence en eau, ce qui les fragilise un peu plus. Les chercheurs d'INRAE étudient les conditions qui favorisent ou défavorisent les ravageurs et comment cette situation influe sur la dynamique de leurs ennemis naturels. Ils ont ainsi découvert qu'un prédateur de pucerons sur tomates, qui se nourrit aussi de la sève de la plante (mais sans l'abîmer), a tendance à être moins actif comme prédateur lorsque la plante est soumise à un stress hydrique. De fait, le développement de l'auxiliaire est altéré et sa pression sur les ravageurs diminue. A l'issue de ces observations, les scientifiques établissent des préconisations sur les mesures à adopter pour réduire les effets délétères liés au changement climatique, sur les agents de biocontrôle.

Tête de Drosophile.



Impact de Bt

En raison de son champ d'action très restreint en milieu naturel, la toxicité de Bt n'affecte pas d'autres espèces que celles ciblées. Mais qu'en est-il de l'Homme ? En effet, même si, au contraire des produits chimiques, le bio-insecticide ne pénètre pas dans le fruit ou le légume, il reste en surface et peut donc être ingéré (d'où l'importance de laver les légumes, mêmes bio, afin d'en éliminer l'essentiel). Dans le cadre du projet Imbio, les chercheurs mesurent les réactions de défense d'un organisme non cible confronté à *Bt Kurstaki*. Les premières études réalisées sur *Drosophila melanogaster* montrent que la bactérie induit effectivement une réponse de l'intestin de l'insecte. En clair, sa présence ne passe pas inaperçue. En outre, en cas d'ingestion régulière, elle peine à être éliminée. Chez un individu sain, cela ne semble pas avoir d'incidence. Mais les chercheurs souhaitent à présent déterminer quelles conséquences peut entraîner cette exposition chronique pour les personnes immunodéprimées. D'autant qu'avec la disparition programmée de certains produits phytosanitaires, l'usage de Bt va augmenter sensiblement à l'avenir.



Consortium public-privé sur le biocontrôle : pour apprendre à déployer les solutions de biocontrôle, l'union fait la force !

Contribuer par la recherche, le développement et l'innovation à l'essor du biocontrôle en France, en concertation avec les pouvoirs publics, voilà l'objectif que se sont fixés les 48 membres du Consortium public-privé sur le biocontrôle, entré en phase opérationnelle en mars 2016. Il regroupe notamment dix instituts académiques, dont INRAE, 13 instituts techniques et 17 entreprises privées. Dès sa création, le Consortium a initié un travail de cartographie dynamique des ressources disponibles dans la communauté recherche et innovation au niveau national comme européen : infrastructures d'expérimentation, collections, mais aussi toutes les compétences utiles à la création de produits, à l'évaluation de leur efficacité ou encore à leur durabilité et leur impact sur l'environnement. A présent, ses membres proposent et conduisent des projets de recherche. Un premier ensemble de projets est destiné dans un premier temps à comprendre les facteurs de succès et d'échec des stratégies de biocontrôle et, dans un second temps à mieux intégrer le biocontrôle dans les itinéraires culturaux. Les projets XP-BC et IBC amorcent cette dynamique en mobilisant les acteurs du développement agricole et de la recherche autour de l'objectif de retravailler les méthodes d'expérimentation sur le biocontrôle et concevoir des systèmes de culture intégrant ces derniers. Ils sont appuyés par deux projets méthodologiques, « CARÉ » qui vise à concevoir une nouvelle technologie pour évaluer l'état de stress abiotique d'une plante, et « VISA » qui vise à développer un réseau de capteurs pour le suivi de maladies fongiques sur vigne, deux types de paramètres à prendre en compte pour utiliser au bon moment les produits de biocontrôle et de stimulation de défense des plantes. Un second ensemble de projets vise à ouvrir de nouvelles pistes d'innovation pour les acteurs de la recherche et l'innovation. Lancé en 2018, le projet BCMicrobiome s'attache par exemple à développer des méthodes pour caractériser les interactions entre les microorganismes associés à une plante, notamment pour identifier de possibles agents de biocontrôle encore inconnus. Un troisième ensemble de projets s'intéresse à la durabilité du biocontrôle, avec le projet « IMPACT » qui vise à développer une méthode de mesure de l'impact environnemental des résidus issus de produits de biocontrôle ; et le projet « BACILLUS » qui s'intéresse aux effets non-intentionnels des toxines des bactéries du genre *Bacillus*, très utilisées en biocontrôle, sur les mammifères.



06.



Les vignobles sous bonne garde

La vigne est l'une des filières agricoles qui consomme le plus de produits phytosanitaires, destinés à lutter contre les insectes ou champignons qui se manifestent tout au long de l'année. Pour réduire leur usage, les chercheurs d'INRAE développent des méthodes de biocontrôle dans toutes les catégories dont certaines, très efficaces, sont adoptées par un nombre croissant de viticulteurs.



La confusion sexuelle en chiffres

60 000 à 80 000 hectares :

c'est la surface protégée par confusion sexuelle, soit 10 % environ du vignoble français

5 ha : c'est la surface minimum qu'il est conseillé de traiter par confusion sexuelle pour que la méthode soit efficace

2 : c'est le nombre de diffuseurs actuellement utilisés en France, donc RAK, mis au point par BASF en partenariat avec INRAE au cours des années 90.

La montée en puissance de la confusion sexuelle

Un parfum délicat se répand dans le vignoble français. N'essayez pas de le percevoir, il est bien trop subtil pour nos récepteurs olfactifs et de toute manière, ce n'est pas à nous qu'il s'adresse. Cette odeur imperceptible, ce sont des phéromones synthétiques qui miment celles produites par des papillons femelles durant la reproduction. Et elles sont si entêtantes que les mâles, ne sachant plus où donner des antennes, s'éteignent avant d'avoir pu assurer leur descendance. Aussi élégante qu'efficace, la méthode de la confusion sexuelle, mise au point par INRAE entre 1974 et 1995, connaît un véritable boom depuis 2010, avec environ 10% des surfaces de vignoble dorénavant protégées.



Dégâts de Eudemis (*Lobesia botrana*) sur raisin.



Inoculation de la bouture de vigne avec une souche répertoriée du champignon pathogène.

Traiter le mal à la racine

Les maladies du bois de la vigne, dont l'esca est la plus préoccupante, rendent 13 % du vignoble français improductif. Il n'existe aucun produit efficace pour les contrôler, depuis l'interdiction en 2001 de l'arsénite de soude. Mais de nouvelles stratégies de biocontrôle se profilent, basées sur l'utilisation d'un microorganisme oomycète naturellement présent dans les vignobles, *Pithium oligandrum*. Lorsqu'il est appliqué sur le système racinaire d'un jeune plant de vigne, il induit une réaction de défense entraînant une résistance accrue à l'égard des champignons pathogènes responsables de l'esca. Durant trois ans, cette méthode nommée « biotisation », a été testée dans le cadre du projet Biotivigne qui réunit INRAE, la société Biovitis et le pépiniériste Mercier Frères. Avec des résultats très encourageants puisque, sur les jeunes plants biotisés puis inoculés par le pathogène, les dommages causés par l'esca ont été réduits de moitié. Afin d'accroître encore cette efficacité, les chercheurs ont tenté d'associer *P. oligandrum* à certaines bactéries sélectionnées parmi une cinquantaine, pour leurs propriétés fongicides. Dans ce cas bien précis, le « cocktail » n'a pas montré l'efficacité escomptée. Mais de l'avis des chercheurs, ce type d'association pourrait fonctionner dans d'autres situations, et constitue sans doute un levier futur du biocontrôle. La société Biovitis poursuit maintenant les démarches en vue d'obtenir l'autorisation de mise sur le marché de deux formulations basées sur l'utilisation de *P. oligandrum*. La première pour la biotisation des jeunes plants, la seconde destinée aux plants adultes, un traitement annuel s'avérant nécessaire pour reconstituer la population d'oomycètes. La suite de ces travaux sera réalisée dans le cadre du projet européen BIOBESTicide porté par la société Biovitis et centré sur les maladies de dépérissement de la vigne. Les maladies du bois de la vigne font également l'objet du projet Advantage (porté par Agrauxine Lesaffre) qui réunit neuf partenaires industriels, techniques et académiques (dont INRAE). Ce projet vise à combiner les stratégies de prévention et de protection en proposant deux nouvelles solutions de biocontrôle et des outils moléculaires et numériques pour diagnostiquer l'état sanitaire d'une vigne et pour simuler la perte de rendement liée aux maladies du bois.



Organiser la résistance

Les stimulateurs de défense des plantes (SDP) vont-ils remplacer les fongicides dans la lutte contre les bioagresseurs de la vigne ? Sans doute pas avant longtemps. Mais bien employés, ils permettent déjà de réduire leur utilisation, comme l'ont constaté les chercheurs d'INRAE. Avant tout parce que les SDP possèdent le plus souvent une action multipathogène, au contraire des fongicides. Des travaux récents montrent ainsi qu'un SDP ciblant le champignon *Botrytis cinerea* limite aussi le développement de l'oïdium et du mildiou. Par ailleurs, lors d'expérimentations menées en 2012, les chercheurs ont constaté qu'une plante traitée par un SDP et ne recevant que la moitié de la dose de fongicides homologuée, résistait aussi bien à l'oïdium et au mildiou qu'une plante traitée uniquement aux fongicides. Et ce n'est qu'un début. Les scientifiques imaginent déjà comment améliorer cette efficacité. Notamment en sélectionnant des variétés partiellement résistantes aux champignons, et qui le deviendraient quasi totalement grâce à l'ajout de SDP, ce qui réduirait ainsi considérablement l'usage d'intrants chimiques ! Les premiers essais conduits en laboratoire montrent d'excellents résultats.



Conidiophore portant des spores de *Botrytis cinerea*.

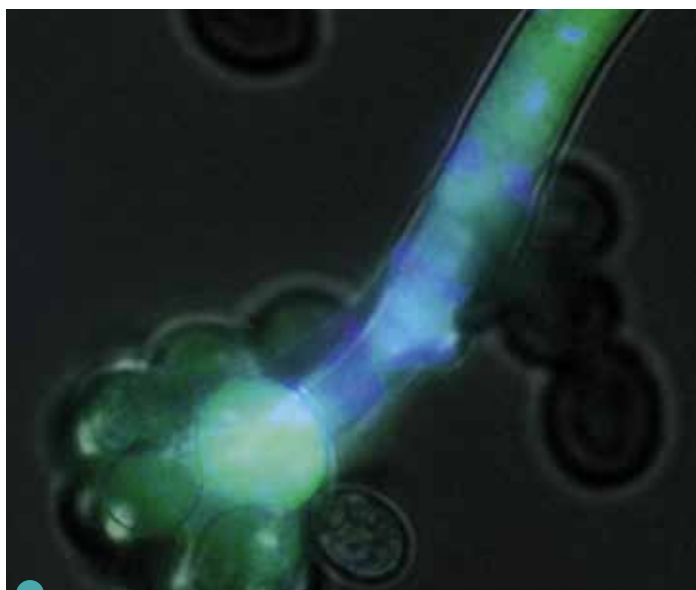


Le Projet GTD Free

Les agents de biocontrôle utilisés seuls comme stimulateurs de défense des plantes ne fourniront pas une protection suffisante contre les maladies du bois. Mais ils ont toute leur place dans une stratégie de lutte plus générale. Lancé en 2016, le projet GTD Free, mené par INRAE et financé par Jas Hennessy & Co et l'Agence nationale de la recherche (dans le cadre de son programme « Chaire industrielle »), s'inscrit dans cette démarche. Ses objectifs sont triples : identifier, dans la microflore de plants prélevés dans différentes régions du monde, les micro-organismes qui, utilisés seuls ou en association, peuvent présenter un intérêt dans le cadre du biocontrôle ; étudier l'influence de pratiques culturales comme la taille des vignes dans l'apparition ou le développement de nécroses dues aux agents pathogènes et sélectionner des cépages ou des clones tolérants aux maladies du bois.

Des bactéries pour lutter contre la pourriture grise

Les producteurs de vins liquoreux l'appellent pourriture noble et guettent avec impatience les premiers signes de son développement sur les grains de raisins. Mais pour la grande majorité des vignerons qui la nomment pourriture grise, c'est une calamité qui peut causer des dommages quantitatifs et œnologiques considérables. L'usage de fongicides de synthèse permet de lutter efficacement contre *Botrytis cinerea* mais les conséquences pour l'environnement et la santé humaine sont loin d'être négligeables. Heureusement, des solutions alternatives se profilent. A l'issue d'un long processus de criblage, les chercheurs d'INRAE ont identifié quatre bactéries potentiellement utilisables en biocontrôle. Non seulement elles se révèlent très compétitives dans la course aux nutriments, privant ainsi *B. cinerea* des ressources nécessaires à son développement, mais elles génèrent aussi des molécules qui lui sont toxiques. Testée en champ, une des souches a montré, dans certains essais, une efficacité comparable à celle des fongicides de synthèse anti-Botrytis, mais elle nécessite deux fois plus d'applications. Or, plus de passage de tracteurs, c'est plus d'émissions de CO₂, plus de consommation de fuel... L'impact environnemental et économique n'étant pas négligeable, les chercheurs s'efforcent à présent d'optimiser l'efficacité de ce nouvel agent prometteur.



Conidiophore (au début de son développement) de *Botrytis cinerea*.

Ça va buzzer dans les rangs !

Et les parasitoïdes dans les vignes, c'est pour quand ? Bientôt, si l'on en juge par l'intérêt que les fournisseurs de ces insectes auxiliaires témoignent pour la filière. Ils seraient d'ailleurs les bienvenus pour lutter contre les vers de grappe (cochylis, eudémis), en complément de la confusion sexuelle. Les recherches sont en cours, dans le cadre du projet européen Euclide coordonné par INRAE : elles visent notamment à déterminer la meilleure façon d'aménager l'environnement pour optimiser l'efficacité des trichogrammes (ces micro-guêpes, mesurant souvent moins d'un millimètre de long, qui sont des parasitoïdes oophages) dans le cadre de la lutte par augmentation. La vigne étant un milieu très sec, notamment en fin de saison, il sera sans doute nécessaire d'installer des bandes fleuries dans les rangs, afin de permettre aux micro-guêpes de trouver la nourriture et l'eau nécessaires à leur bien-être. Mais il ne fait aucun doute que cette méthode de biocontrôle s'ajoutera bientôt à l'arsenal des outils utilisés en viticulture.



Trichogramme.



Inoculation artificielle d'oidium.

La plateforme Biocontrol2Grape

Créée en collaboration entre INRAE et l'IFV, avec le soutien de l'Institut Carnot Plant2Pro® et des infrastructures de l'ISSVV, la plateforme Biocontrol2Grape est localisée sur le centre INRAE de Bordeaux. Dédiée à l'évaluation des produits de biocontrôle et de biostimulation au vignoble, la plateforme propose des capacités d'expérimentation et d'analyse inédites : des bio-essais en conditions contrôlées et semi-contrôlées sur l'ensemble des bioagresseurs de la vigne (test d'efficacité et étude du mode d'action), des parcelles plantées de différents cépages sensibles et de variétés résistantes afin d'évaluer la réponse de différents génotypes aux traitements de biocontrôle et de biostimulation, un système de brumisation au vignoble pour maîtriser les contaminations artificielles des bioagresseurs et un matériel d'application contrôlée de traitements expérimentaux (Pulvexper).

Les pratiques agricoles définissent la biodiversité

Dans les paysages de culture annuelle, il est nécessaire de maintenir des habitats semi-naturels (tels que des forêts, des haies ou des prairies permanentes), afin de favoriser la présence d'auxiliaires et d'optimiser la régulation naturelle des ravageurs. Mais il en va tout autrement dans les vignobles, comme l'ont démontré les chercheurs d'INRAE impliqués dans le projet Solution. Dans ces cultures pérennes, ce sont, en premier lieu, les pratiques viticoles au sein des paysages qui déterminent la diversité et l'abondance des auxiliaires. Des travaux ont permis d'évaluer notamment les performances de l'agriculture biologique en termes de préservation de la biodiversité, et de quantifier les services rendus par cette biodiversité. Les résultats montrent que, dans les paysages dominés par la viticulture conventionnelle, la présence de quelques parcelles en agriculture biologique n'influence pas la quantité et la diversité des arthropodes, qui comptent parmi les plus importants prédateurs. En revanche, si la viticulture biologique est majoritaire, alors on observe un effet positif pour les auxiliaires, qui sont alors en moyenne plus abondants voire plus diversifiés. Avec pour conséquence, une meilleure régulation naturelle des ravageurs, y compris dans les parcelles proches exploitées selon des pratiques conventionnelles. Autre observation, contrairement aux idées reçues, le fait d'augmenter la proportion de parcelles conduites en viticulture biologique dans les paysages ne modifie pas la pression exercée par les ravageurs et les maladies. Notamment parce que les viticulteurs disposent de leviers agronomiques suffisants pour limiter leur propagation. Ces recherches vont permettre de proposer des pistes d'aménagement des paysages à de larges échelles, en réponse aux objectifs des pouvoirs publics, qu'il s'agisse de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires ou de préserver la biodiversité.





Contacts scientifiques



Coordinateur scientifique :

Thibaut Malausa

thibaut.malusa@inrae.fr - 04 92 38 65 06
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

01. Des odeurs pour lutter contre les ravageurs

Des récepteurs olfactifs dans le viseur /
Qu'est-ce que ça sent ? /

Le carpocapse, accro à l'ester /
Quel goût ça a ?

Emmanuelle Jacquin-Joly

emmanuelle.joly@inrae.fr - 01 30 83 32 12
Institut d'Ecologie et des sciences de l'environnement
de Paris, INRAE Ile-de-France - Versailles-Grignon

La bruche de la féverole / Stop aux
mauvaises odeurs ! / Comment
reproduire une phéromone ?

Brigitte Frérot

brigitte.frerot@inrae.fr - 01 30 83 31 44
Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement
de Paris, INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

Les chenilles processionnaires

Anne-Sophie Brinquin

anne-sophie.brinquin@inrae.fr - 04 32 72 29 00
unité Entomologie et forêt méditerranéenne,
INRAE PACA

Tous aux abris !

Amélie Lefèvre

amelie.lefevre@inrae.fr - 04 68 37 74 05
unité Domaine Expérimental Alénya-Roussillon,
INRAE Occitanie-Montpellier

Maria Navajas

maria.navajas-navarro@inrae.fr - 04 99 62 33 34
Centre de biologie pour la gestion des populations,
INRAE Occitanie-Montpellier

02. Les macro-organismes : des alliés de taille

De précieuses micro-guêpes :

les trichogrammes /

Auxiliaire de déminage

Elisabeth Tabone

elisabeth.tabone@inrae.fr - 04 97 21 25 17
unité Entomologie et forêt méditerranéenne,
INRAE PACA

L'exemple emblématique de la pyrale
du maïs / Une collection de
trichogrammes uniques au monde /
Entomopolis : les insectes sous haute
surveillance

Nicolas Ris

nicolas.ris@inrae.fr - 04 92 38 65 01
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Le crépuscule du Cynips du
châtaignier / *Mastrus ridens* va croquer
le carpocapse de la pomme

Nicolas Borowiec

nicolas.borowiec@inrae.fr - 04 92 38 65 00
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Quand le biocontrôle se met au ver

Jean-Claude Ogier

jean-claude.ogier@inrae.fr - 04 67 14 33 77
unité Diversité, génomes et interactions
microorganismes-insectes,
INRAE Occitanie-Montpellier

Les nématodes entomopathogènes
et leurs bactéries symbiotiques
au service du biocontrôle

Sylvie Pagès

sylvie.pages@inrae.fr - 04 67 14 33 77

Alain Givaudan

givaudan@univ-montp2.fr - 04 67 14 48 12
DGIMI, INRAE Occitanie-Montpellier

Les vers, futurs coursiers de la lutte bio

Sophie Gaudriault

sophie.gaudriault@inrae.fr - 04 67 14 48 12
unité Diversité, génomes et interactions
microorganismes-insectes,
INRAE Occitanie-Montpellier

Soigner le mal par le mâle :

la Technique de l'insecte stérile

Simon Fellous

simon.fellous@inrae.fr
Centre de biologie pour la gestion des populations,
INRAE Occitanie-Montpellier

Quand la guêpe prend la mouche

Jean-Luc Gatti

jean-luc.gatti@inrae.fr - 04 92 38 65 64
ISA, INRAE PACA

La lutte biologique par conservation /
L'organisation des bords de parcelles
et des paysages

Claire Lavigne

claire.lavigne@inrae.fr - 04 32 72 26 66
unité de recherche Plantes et Systèmes de Culture
Horticoles, INRAE PACA

Les mésanges, gardiennes des vergers

Jean-Charles Bouvier

jean-charles.bouvier@inrae.fr - 04 32 72 26 76
unité Plantes et Systèmes de culture Horticoles,
INRAE PACA

03. Une panoplie de micro-organismes protecteurs

Beaucoup d'appelés, très peu d'élus

Marc Bardin

marc.bardin@inrae.fr - 04 32 72 28 42

Philippe Nicot

philippe.nicot@inrae.fr - 04 32 72 28 59
unité Pathologie végétale, INRAE PACA

Oomycide volontaire

Michel Ponchet

michel.ponchet@inrae.fr - 04 92 38 65 27
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Biofilm d'horreur

Eric Galiana

eric.galiana@inrae.fr - 04 92 38 64 72
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Un virus pour lutter contre le carpocapse

Myriam Siegwart

myriam.siegwart@inrae.fr - 04 32 72 24 44
unité de recherche Plantes et Systèmes de Culture
Horticoles, INRAE PACA

Les densovirus, petits, mais costauds

Mylène Ogliaastro

marie-helene.ogliaastro@inrae.fr - 04 67 14 41 19
unité Diversité, génomes et interactions
microorganismes-insectes,
INRAE Occitanie-Montpellier

Un virus qui castagne

Cécile Robin

cecile.robin@inrae.fr - 05 35 38 52 92
Biodiversité, Gènes et Communautés,
INRAE Nouvelle Aquitaine

04. Les substances naturelles bénéfiques

Au cœur de la patate douce

Jean-Luc Poëssel

jean-luc.poessel@inrae.fr - 04 32 72 26 78
unité Génétique et amélioration des fruits et légumes,
INRAE PACA

Une sélection impitoyable

Marc Bardin

marc.bardin@inrae.fr - 04 32 72 28 42
unité Pathologie végétale, INRAE PACA

Et contre les mauvaises herbes, on fait quoi ?

Muriel Viaud

muriel.viaud@inrae.fr - 01 30 81 45 68
BIOlogie GEstion des Risques en agriculture,
INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

Christophe Robin

christophe.robin@inrae.fr - 03 83 59 58 56
laboratoire Agronomie et Environnement,
INRAE Grand Est-Nancy

Comprendre les interactions hôte-parasitoïde pour ouvrir de nouvelles pistes d'innovation

Anne Nathalie Volkoff

anne-nathalie.volkoff@inrae.fr - 04 67 14 41 18
unité Diversité, Génomes et Interactions
Microorganismes-Insectes,
INRAE Occitanie-Montpellier

Des plantes à tannins pour lutter contre des vers parasites des chèvres et moutons

Hervé Hoste

h.hoste@envt.fr - 05 61 19 38 75
unité Interactions hôtes-agents pathogènes
INRAE Occitanie-Toulouse

Vincent Niderkorn

vincent.niderkorn@inrae.fr - 04 73 62 40 69
unité mixte de recherche sur les Herbivores
NRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Les toxines de *Bacillus thuringiensis* / Impact de Bt

Armel Gallet

armel.gallet@inrae.fr - 04 92 38 65 19
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

La stimulation de défenses des plantes, un mode d'action particulier / Vérifier rapidement l'efficacité d'un SDP

Marie-Noëlle Brisset

marie-noelle.brisset@inrae.fr - 02 41 22 57 13
Institut de Recherche en Horticulture et Semences,
INRAE Pays de la Loire

05. Déployer le biocontrôle à large échelle, un défi pour la recherche

La confusion sexuelle, un énorme potentiel... et défi de déploiement !

Denis Thiéry

denis.thiery@inrae.fr - 05 57 12 26 18
unité Santé et agroécologie du vignoble,
INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Des pièges améliorés et connectés

Jean-Philippe Trani

jean-philippe.trani@inrae.fr - 04 67 04 63 75

Jean-Paul Douzals

jean-paul.douzals@inrae.fr - 04 67 16 65 03
Information et Technologies pour les Agroprocédés,
INRAE Occitanie Montpellier

Du bon usage des auxiliaires

Ludovic Mailleret

ludovic.mailleret@inrae.fr - 04 92 38 65 05
Institut ISA, INRAE PACA

Elodie Vercken

elodie.vercken@inrae.fr - 04 92 38 65 53
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Le projet Peerless

Etienne Klein

etienne.klein@inrae.fr - 04 32 72 21 54

Lionel Roques

lionel.roques@inrae.fr - 04 32 72 21 53
unité Biostatistique et Processus Spatiaux,
INRAE PACA Avignon

Découpler l'utilisation des micro-guêpes trichogrammes

Thibaut Malausa

thibaut.malausa@inrae.fr - 04 92 38 65 06
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Combinaison des stratégies *via* des agents doubles : l'entomovectoring

Alexandre Bout

alexandre.bout@inrae.fr - 04 92 38 64 08
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Associer biocontrôle et autres méthodes et pratiques

Sylvain Fournet

sylvain.fournet@inrae.fr - 02 23 48 51 59

Josselin Montarry

josselin.montarry@inrae.fr - 02 23 48 51 59
Institut de Génétique Environnement et Protection
des Plantes, INRAE Bretagne Normandie

Michel Ponchet

michel.ponchet@inrae.fr - 04 92 38 65 27
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

S@M, l'allier numérique des horticulteurs

Christine Poncet

christine.poncet@inrae.fr - 04 92 38 65 26
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Le Consortium Biocontrôle

Cécilia Multeau

cecilia.multeau@inrae.fr - 04 99 61 21 58 / 07 78 88 36 83)
chargée de partenariat et d'innovation biocontrôle,
département Santé des plantes et environnement,
INRAE Occitanie-Montpellier

Les champignons se rebellent

Philippe Nicot

philippe.nicot@inrae.fr - 04 32 72 28 59
unité Pathologie végétale, INRAE PACA

Le carpocapse fait de la résistance

Myriam Siegwart

myriam.siegwart@inrae.fr - 04 32 72 24 44
unité de recherche Plantes et Systèmes de Culture
Horticoles, INRAE PACA

Quand le climat s'en mêle

Nicolas Desneux

nicolas.desneux@inrae.fr)
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

Impact de Bt

Armel Gallet

armel.gallet@inrae.fr - 04 92 38 65 19

Marcel Amichot

marcel.amichot@inrae.fr - 04 92 38 65 84
Institut Sophia Agrobiotech, INRAE PACA

06. Les vignobles sous bonne garde

La montée en puissance de la confusion sexuelle / Ça va buzzer dans les rangs !

Denis Thiéry

denis.thiery@inrae.fr - 05 57 12 26 18
unité Santé et agroécologie du vignoble,
INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Traiter le mal à la racine

Marc Fermaud

marc.fermaud@inrae.fr - 05 57 12 26 22
unité SAVE, INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Organiser la résistance

Marie-France Corio-Costet

marie-france.corio-costet@inrae.fr - 05 57 12 26 25
INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Des bactéries pour lutter contre la pourriture grise

Marc Fermaud

marc.fermaud@inrae.fr - 05 57 12 26 22
unité SAVE, INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Le Projet GTD Free

Patrice Rey

patrice.rey@inrae.fr - 05 57 12 26 14
unité SAVE, INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Les pratiques agricoles définissent la biodiversité

Adrien Rusch

adrien.rusch@inrae.fr - 05 57 12 26 43
Santé et Agroécologie du Vignoble,
Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux



Centre-siège Paris-Antony
Service Presse
Tél.: +33(0)1 42 75 91 86
presse.inrae.fr

Rejoignez-nous sur:



inrae.fr/presse

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre