

Projet MÉDÉE



Vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modÉlisation à la concertation territoriale pour le DÉploiEment des cépages Résistants (MÉDÉE)

« Ecophyto II : Leviers territoriaux pour réduire l'utilisation et les risques liés aux produits phytopharmaceutiques »

Rapport final

*Adeline Alonso Ugaglia, Marta Zaffaroni, Anne-Sophie Miclot,
Loup Rimbaud, Julien Papaix, Jean-François Rey, Frédéric
Fabre*

Date de la version du rapport : 09/09/2024

Coordonnées du laboratoire : UMR INRAE 1065 SAVE – Centre INRAE Bordeaux Nouvelle Aquitaine - 71, Avenue Edouard Bourlaux – CS 20032 – 33882 Villenave d'Ornon cedex

Identité et coordinateur du projet de recherche : Frédéric FABRE (frederic.fabre@inrae.fr / 05 57 12 26 42) et Adeline ALONSO UGAGLIA (adeline.ugaglia@inrae.fr)

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+.

Projet MÉDÉE

Table des matières

SYNTHÈSE	3
Contexte général et enjeux scientifiques et techniques.....	6
Objectifs généraux du projet.....	7
Quelques éléments de méthodologie (et difficultés éventuelles rencontrées)	7
Résultats obtenus.....	9
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation.....	10
Partenariats mis en place, projetés, envisagés	13
Pour en savoir plus (quelques références)	14
Bibliographie citée dans le rapport	14
Liste des opérations de valorisations issues du contrat (articles de valorisation, participation à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)	16
Résumés	19
RAPPORT SCIENTIFIQUE	22
<i>Dans le rapport scientifique, nous vous prions de fournir des éléments méthodologiques présentés succinctement et clairement afin de pouvoir avoir une vision des limites des résultats</i>	<i>22</i>
Annexe : textes des publications	39
Annexe : partie confidentielle.....	40

Projet MÉDÉE

SYNTHÈSE

(Destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics : environ 10 pages, hors liste des publications et autres valorisations)

Merci de rédiger l'ensemble de cette partie de manière à ce qu'elle soit aisément compréhensible par un utilisateur non spécialiste.

Vous mettrez en évidence les points qui vous paraissent les plus porteurs pour l'élaboration, le suivi ou la mise en œuvre de politiques publiques de diminution des risques environnementaux liés aux pesticides et notamment pour le plan Écophyto.

Projet MÉDÉE



Vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modÉlisation à la concertation territoriale pour le DÉploiEmEnt des cépages Résistants (MÉDÉE)

« Ecophyto II : Leviers territoriaux pour réduire l'utilisation et les risques liés aux produits phytopharmaceutiques »

Synthèse pour les décideurs

Adeline Alonso Ugaglia^{1,2}, Marta Zaffaroni^{2,3}, Anne-Sophie Miclot², Loup Rimbaud⁴, Julien Papaix³, Jean-François Rey³, Frédéric Fabre²

Date de la version du rapport : 30/09/2024

Coordonnées des laboratoires :

¹ Bordeaux Sciences Agro, UMR SAVE, ISVV, 33175, Gradignan, France

² INRAE, Bordeaux Sciences Agro, UMR SAVE, 33882 Villenave d'Ornon, France

³ INRAE, BioSP, 84914 Avignon, France

⁴ INRAE, PV, 84140 Montfavet, France

Identité et coordinateur du projet de recherche (adresse et courriel)

Coordonnées du laboratoire : UMR INRAE 1065 SAVE – Centre INRAE Bordeaux Nouvelle Aquitaine - 71, Avenue Edouard Bourlaux – CS 20032 – 33882 Villenave d'Ornon cedex

Identité et coordinateur du projet de recherche : Frédéric FABRE (frederic.fabre@inrae.fr / 05 57 12 26 42) et Adeline ALONSO UGAGLIA (adeline.ugaglia@inrae.fr)

Projet MÉDÉE

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

Projet MÉDÉE

Contexte général et enjeux scientifiques et techniques

La gestion des populations de bioagresseurs dans la majorité des systèmes agricoles actuels est fortement dépendante des produits phytosanitaires, notamment sur certaines cultures pérennes telles que la vigne. Ainsi, l'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen pour les vignobles français était de 12.4 en 2019, alors que celui du blé, qui occupe plus du quart de la surface des terres arables en France, était de 4,9 en 2017 (Agreste, 2019 ; 2021). Cette situation résulte principalement de deux maladies fongiques, l'oïdium et le mildiou, qui représentent près de 80% des pesticides utilisés sur vigne (Fouillet *et al.*, 2022). La réduction de l'utilisation des pesticides est donc un enjeu clé pour la durabilité de la viticulture et pour répondre aux fortes attentes sociétales concernant la préservation de l'environnement et de la santé humaine.

L'adoption des variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium constitue une innovation prometteuse pour la réduction de l'IFT. Un des enjeux du déploiement des variétés résistantes réside dans la gestion de la durabilité des résistances. En effet, tout comme l'utilisation des antibiotiques favorise la sélection de bactéries résistantes, cultiver des variétés résistantes favorise la sélection d'agents pathogènes capables de contourner les gènes de résistances aux maladies. La survenue de tels contournements prive alors la boîte à outil des agriculteurs d'un levier majeur de protection des plantes. De ce fait, les gènes de résistance constituent un type de bien économique appelé bien commun (Hannachi *et al.*, 2021). Depuis les travaux d'Ostrom (1990), récompensée par le prix Nobel d'économie en 2009, il est reconnu que les biens communs peuvent être gérés durablement par des acteurs locaux en situation de concurrence via des organisations collectives dont les membres partagent un intérêt commun et en développant des stratégies et outils de gestion communs.

Les sélectionneurs, qui créent les variétés et les agriculteurs qui les déploient, disposent chacun de plusieurs leviers d'actions pour gérer la durabilité des résistances. L'obtention de variétés résistantes pyramidées, c'est-à-dire cumulant plusieurs facteurs de résistance, est un levier à disposition des sélectionneurs pour favoriser la durabilité des résistances (REX Consortium, 2013) qui a été mis en œuvre dans le programme ResDur conduit par INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) depuis le début des années 2000. Il a permis d'inscrire au catalogue national des variétés de vigne cumulant plusieurs gènes de résistances à l'oïdium et au mildiou dès 2018, en complément d'autres variétés résistantes issues de programmes européens plus anciens et ne disposant que d'un gène de résistance (résistance monogénique). Les agriculteurs disposent également de plusieurs leviers pour promouvoir une gestion durable des résistances, notamment au travers des choix variétaux qu'ils opèrent lors de la plantation des parcelles au vignoble. Ces choix sont importants car ils conditionnent directement la dynamique d'adaptation des bioagresseurs et donc la durabilité des résistances (Zhan *et al.*, 2015). L'importance des choix de plantation est encore accrue lorsque, comme dans notre cas d'étude, ils s'opèrent sur des variétés partageant certains facteurs de résistances. Plus encore, les choix d'aujourd'hui vont conditionner le succès des futures générations de variétés résistantes qui cumuleront cette fois trois facteurs de résistance au mildiou et à l'oïdium, ainsi que le succès des programmes de sélection des variétés résistantes à typicité régionale (programme Newwine porté l'IFV). La mise en place d'une stratégie de déploiement efficace visant à gérer sur le long terme l'efficacité des variétés résistantes est donc essentielle.

Dans le cas des maladies aériennes telles que le mildiou, les stratégies de déploiement des variétés résistantes doivent être réfléchies à l'échelle des territoires viticoles tout d'abord pour des raisons biologiques (Gilligan, 2008). En effet, les propagules infectieuses des agents pathogènes à dispersion aérienne (spores, vecteurs biologiques tels que les insectes) se dispersent très souvent à des distances bien supérieures à la taille des parcelles, faisant du paysage une échelle pertinente pour leur gestion face à l'étendue des surfaces en jeu (typiquement un bassin de production) et aux durées nécessaires pour observer l'adaptation des agents pathogènes (typiquement plusieurs années). L'expérimentation au sens classique est inopérante pour comparer des stratégies de déploiement à ces échelles. Il s'avère alors utile de se tourner vers la modélisation mathématique qui fournit des outils de prospective stratégique permettant par exemple de simuler les conséquences d'une vaste gamme de stratégies possibles de déploiement de variétés résistantes (Rimbaud *et al.*, 2021ab). En outre, la modélisation a des vertus pédagogiques permettant de sensibiliser les acteurs à la notion de durabilité des résistances et d'expliquer les mécanismes biologiques à l'œuvre. L'échelle du paysage devient territoriale dès lors qu'interviennent les acteurs sociaux, économiques et institutionnels. Le territoire est en effet un construit social entre un paysage et des acteurs. Il est aussi l'échelle naturelle d'organisation et d'intervention d'une

Projet MÉDÉE

coopérative, où sont prises des décisions aussi bien individuelles que collectives, pour des stratégies gagnant-gagnant. De par leur rôle de conseil et d'accompagnement de leurs membres, les coopératives peuvent donc être considérées comme des organisations en capacité de garantir une gestion collective et durable des variétés résistantes aux maladies. À cet égard, elles s'apparentent à une forme d'organisation collective capable de gérer des biens communs.

Enfin, la plantation des variétés de vigne résistantes aux maladies répond également à un cadre réglementaire, notamment dans les vins produits en Appellation d'Origine Protégée (AOP) qui représentent 51% du vignoble en France. Les variétés résistantes peuvent désormais intégrer à titre expérimental le cahier des charges des AOP en tant que Variétés d'Intérêt à des Fins d'Adaptation (VIFA). Afin de maîtriser les conséquences de l'introduction des VIFA dans les vins commercialisés sous AOP, la procédure prévoit que le bénéfice de l'AOP puisse être maintenu aux conditions suivantes : (i) une limitation à 5 % des surfaces de l'encépagement d'une exploitation agricole, et (ii) une incorporation dans les assemblages de vins commercialisés sous AOP limitée à 10 % d'une structure. La période d'observation des expérimentations est fixée à 10 ans minimum à la suite de laquelle, les variétés pourront être définitivement intégrées au cahier des charges, retirées du cahier des charges, ou la période d'observation est prolongée de 5 ans (au choix des AOP).

Objectifs généraux du projet

Le projet Médée poursuivait trois objectifs. Dans la première partie du projet, nous avons développé un modèle mathématique couplant mécanismes biophysiques de l'épidémiologie et analyses économiques pour simuler des scénarios de déploiement de variétés portant des résistances monogéniques et polygéniques au mildiou dans des territoires viticoles. Le modèle développé permet d'évaluer les effets de différents scénarios de déploiement sur le contrôle des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction du nombre de traitements fongicides et leurs performances économiques multi-échelles (parcelle, exploitation, territoire).

Dans la deuxième partie du projet, motivé par la possibilité désormais offerte aux viticulteurs de planter des variétés portant la seule résistance Rpv3 aux côtés de variétés portant à la fois Rpv1 et Rpv3, nous avons utilisé le modèle développé pour explorer de manière théorique les effets de cette coexistence potentielle de variétés monogéniques et polygéniques dans des paysages agricoles simplifiés.

Enfin, nous avons travaillé sur le territoire et le parcellaire de la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet" (AOP Buzet), avec ses équipes, pour co-construire, évaluer et comparer un ensemble de scénarios collectifs de déploiement des vignes résistantes au mildiou répondant à la vision stratégique des acteurs.

Quelques éléments de méthodologie (et difficultés éventuelles rencontrées)

Un projet qui utilise la modélisation grâce à une adaptation du Modèle *landsepi*

Le projet s'est appuyé sur le modèle *landsepi* « Landscape Epidemiology and Evolution », développé à INRAE par les unités BioSP et Pathologie Végétale (centre d'Avignon), en collaboration avec le CSIRO (centre de Canberra, Australie) (Rimbaud *et al.*, 2018a). Il repose sur une architecture SEIR qui distingue plusieurs catégories de plantes (ou de parties de plante, typiquement des feuilles) en fonction de leur état sanitaire : sain (S), latent (E), infectieux (I), inactif (R) (au sens épidémiologique). Ce modèle est par ailleurs un modèle spatio-temporel, démogénétique et stochastique. Il simule la propagation et l'évolution d'un agent pathogène dans un paysage agricole suite au déploiement d'une ou plusieurs variétés résistantes. Ce faisant, il est possible de comparer un ensemble de stratégies de déploiement selon des critères épidémiologiques (santé des plantes), évolutifs (durabilité des résistances), et économiques (rentabilité des systèmes de production), mais également de mesurer l'impact de l'organisation du paysage, du contexte épidémiologique et du pathosystème considéré sur la performance des

Projet MÉDÉE

stratégies (Rimbaud *et al.*, 2018b). Programmé en langages R et C, il peut être installé et utilisé librement grâce au package R du même nom¹. Au début du projet Médée, le modèle *landsepi* était paramétré uniquement pour les rouilles des céréales.

La première étape du projet a consisté à rajouter 4 fonctionnalités au modèle *landsepi*. Il s'est agi en premier lieu de deux fonctionnalités relatives à la biologie en permettant (1) qu'un agent pathogène intègre dans son cycle de vie des étapes de reproduction sexuée et en proposant (2) des valeurs de paramètres spécifiques de l'interaction entre les populations de mildiou et les facteurs de résistances Rpv1 et Rpv3 à partir des données de l'Observatoire national du déploiement des cépages résistants (OSCAR). En second lieu, pour faciliter le dialogue et l'appropriation du modèle par les techniciens et les viticulteurs, il s'est agi (3) d'ajouter un module simulant l'effet des traitements fongicides sur les épidémies pour modéliser l'effet des stratégies de protection fongicide sur les dynamiques épidémiques, et (4) d'un module d'analyse économique (coût/bénéfice) des stratégies de déploiement pour comparer les stratégies de déploiement sur des critères économiques en utilisant une analyse coût-bénéfice (comportant le produit annuel, le coût de la plantation, le coût de la protection phytosanitaire annuelle et le bénéfice net annuel) menée à 3 échelles spatiales : (i) sur chaque parcelle du territoire chaque année, (ii) sur chaque exploitation (considérée comme un ensemble de parcelles) et (iii) sur l'ensemble du territoire de la cave coopérative (considéré comme l'ensemble des exploitations).

Un projet basé sur des ateliers participatifs pour co-construire et tester des stratégies de déploiement sur le territoire de la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet"

Le projet s'est également appuyé sur le territoire de l'Appellation d'Origine Protégée viticole de Buzet grâce à un partenariat avec la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet". Cette AOP, obtenue en 1973, est située en Lot-et-Garonne (47) autour de la commune de Buzet-sur-Baïse. Délimitée par la Garonne au nord et à l'est, et par le massif forestier des Landes à l'ouest, son territoire s'étend sur 27 communes et compte approximativement 3800 parcelles en production. Fondée en 1953, la cave coopérative regroupe la majorité des producteurs de l'AOP (160 producteurs en 2023) sur 1935 ha de vigne, soit 95% de la production de l'AOP. De par son rôle prescripteur, la coopérative assure, via son cahier des charges, une certaine homogénéité des pratiques (95% du vignoble certifié HVE, AB ou en conversion depuis 2020), des coûts de production et une politique commune de valorisation des produits. En 2020, la production était d'environ 13 millions de bouteilles.

Un travail de co-construction de scénarios collectifs de déploiement des variétés de vignes résistantes (VR) au mildiou a été conduit avec les équipes de la cave coopérative. Il a pris la forme d'une série de 4 ateliers organisés sur une base mensuelle (janvier-juin 2023) dans les locaux de la coopérative. Les ateliers se sont déroulés en présence du directeur de la cave coopérative, des responsables des différents services (vigne, marketing, recherche et innovation) de la coopérative, des chercheurs de l'équipe INRAE (épidémiologie, modélisation biomathématique, pathologie végétale, développement informatique, économie) sous le regard d'un sociologue indépendant avec une mission d'observation, et d'une illustratrice pour la facilitation graphique. Les ateliers ont permis de définir six scénarios de déploiement des variétés résistantes testés sur le parcellaire réel de deux zones du territoire ("Coeur du vignoble" et "Vignoble à faible densité"). Initialement, toutes les parcelles des deux zones considérées dans le vignoble sont cultivées avec des variétés sensibles (VS) d'âges connus. Les scénarios consistent à replanter au cours des 30 années de simulation considérées les parcelles avec une VS ou une VR selon plusieurs critères : renouvellement des parcelles âgées de plus de 30 ans, respect de la réglementation VIFA, implantation à proximité de zones sensibles, etc. Dans le scénario S1, toutes les parcelles sont plantées avec une VR dès que leur âge dépasse 30 ans, alors que dans le scénario S2 ces replantations concernent chaque année les 3.3% des parcelles les plus âgées. Les scénarios S3 et S4 intègrent des contraintes sur le pourcentage maximum de surfaces plantées par exploitation avec des VR, 5% dans le scénario S3 (en accord avec la réglementation VIFA), et 20% dans le scénario S4 (hypothèse d'un assouplissement réglementaire). Enfin, la localisation des parcelles plantées en VR a été testée dans les scénarios S5 et S6 en ciblant les Zones Non Traitée (ZNT) aquatique (c'est-à-dire à proximité de cours d'eau ou éléments du réseau hydrographiques) ou riverain (c'est-à-dire à proximité d'habitations). Ces zones sont soumises à une interdiction de traitements phytosanitaires avec des produits de synthèse à l'exception des produits de biocontrôle ou de ceux autorisés en agriculture biologique. Au final, les six scénarios se différencient notamment par le pourcentage de surface cultivée en VR à l'issue des

¹<https://CRAN.R-project.org/package=landsepi>

Projet MÉDÉE

30 années simulées. Pour quatre d'entre eux, moins de 19 % des surfaces sont replantées avec des VR (S3, S4, S5, S6) alors que plus de 95% le seront dans les deux autres (S1 et S2). De plus, seul le scénario S2 correspond à une introduction progressive des VR ; dans les cinq autres la structure d'âge du parcellaire se traduit par une introduction rapide des VR dès les premières années de simulation. Un scénario statu quo S0 dans lequel seules des VS sont plantées a également été simulé pour servir de point de comparaison.

Résultats obtenus

La coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques est risquée pour la durabilité

La question des risques associées à la coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et de variétés avec des résistances polygéniques se pose pour les gènes Rpv1 et Rpv3 de résistance de la vigne au mildiou. Ces facteurs de résistances peuvent être déployés i) dans la même variété (stratégie pyramidage "PY"), ii) dans des variétés monogéniques cultivées dans la même parcelle (stratégie mélange "MI"), iii) dans des variétés monogéniques cultivées dans des parcelles différentes (stratégie mosaïque "MO"), ou iv-v) dans des stratégies hybrides qui combinent le pyramidage avec les mélanges ou les mosaïques (stratégies "PY+MI" et "PY+MO"). Nous avons utilisé le modèle *landsepi* décrit dans Zaffaroni *et al.* (2024b)² pour comparer les contrôles évolutif et épidémiologique procurés par les trois stratégies PY, PY+MI et PY+MO. Nous nous sommes appuyés sur des déploiements dans un paysage simplifié, composé de 400 parcelles carrées de 1 ha chacune. A faible probabilité de mutation vers la virulence, nos résultats montrent que les contrôles évolutif et épidémiologique fournis par la stratégie pyramidage sont compromis dès lors que des variétés monogéniques sont simultanément plantées dans le paysage (stratégies hybrides PY+MI et PY+MO), y compris en faible proportion. De plus, l'efficacité de la stratégie pyramidage par rapport aux stratégies hybrides varie selon que les souches adaptées paient un coût d'adaptation sur l'ensemble des variétés considérées (sensibles comme résistantes) ou seulement pour leurs virulences superflues, et ce particulièrement lorsque ces coûts sont élevés. Dans la première situation (fort coût de fitness payé uniquement pour les virulences superflues), la stratégie pyramidage surclasse les stratégies hybrides, alors que les performances sont comparables dans la seconde situation (fort coût de fitness payé sur toutes les variétés). Nos résultats montrent également que le différentiel de performance entre les trois stratégies s'estompe fortement à forte probabilité de mutation vers la virulence. Les performances de la stratégie pyramidage font toutefois toujours jeu égal, voire sont substantiellement meilleures, que celles des stratégies hybrides dans l'ensemble des états du nature testé, c'est-à-dire des combinaisons de paramètres prise en compte dans nos simulations.

Exploration des stratégies de déploiement dans le territoire de la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet" au travers d'ateliers participatifs

Chaque scénario a été testé, discuté et commenté vis-à-vis des sorties du modèle (durabilité de la résistance, contrôle de la maladie, nombre de traitements et bénéfices nets) : impacts environnementaux (nombre de traitements/parcelle/année) et économiques (bénéfices nets) sous trois hypothèses de valeurs de coûts de fitness dans les deux paysages de la cave coopérative. Les différences entre ces deux zones étant mineures, nous ne les commenterons pas dans la suite.

Le nombre de traitements fongicides appliqués par saison de culture et par parcelle est, à l'image du contrôle épidémiologique, fortement influencé par la proportion de VR déployée. Les scénarios S1 et

² Suite à l'ajout de la reproduction sexuée dans le modèle, nous avons conduit une première étude théorique visant à mieux comprendre l'effet de la recombinaison génétique (spécifique des phases sexuées de reproduction) sur les conséquences évolutives et épidémiologiques des quatre principales stratégies de déploiement de deux gènes majeurs de résistances (pyramidage, rotation, mélange et mosaïque) (Zaffaroni *et al.*, 2024a). Nos résultats montrent que l'établissement des « super-pathogènes », c'est-à-dire des agents pathogènes contournant l'ensemble des variétés résistantes présentes dans un paysage, est favorisé par la recombinaison génétique avec les stratégies mélange et mosaïque. En revanche, le régime de reproduction n'affecte pas (ou peu) l'efficacité de la protection contre la maladie, et ce quelle que soit la stratégie de déploiement considérée.

Projet MÉDÉE

S2, dans lesquels la quasi-totalité des parcelles sont replantées avec des VR au bout de 30 ans, fournissent les meilleurs résultats (réduction du nombre de traitement moyen de 83% avec S1 et de 51% avec S2). La meilleure performance du scénario S1 résulte de l'introduction initiale massive de VR (plus de 65% des parcelles replantées avec des VR dès la première année) contre seulement 50% des parcelles après 15 ans avec le scénario S2). À l'inverse, les plus faibles surfaces replantées en VR avec les scénarios S4 à S6 conduisent à des économies de traitement moindre, allant de 39% pour S4 à 5% pour S6. Derrière ces tendances moyennes, les résultats diffèrent également par la variabilité inter-simulations, mise en évidence par l'étendue des intervalles de confiance à 80 %. Cette variabilité, bien plus importante dans les scénarios S1 et S2, s'explique par les contournements de résistances qui, lorsqu'ils surviennent, annulent le bénéfice des VR sur de larges portions du paysage. En résultent des distributions du contrôle épidémiologique et des nombres de traitements appliqués très fortement bimodales. Par ailleurs, à la différence des valeurs moyennes des économies de traitements qui ne dépendent pas des coûts de virulence payés par les agents pathogènes, de forts coûts de virulence (0.25) réduisent les intervalles de confiance. En pratique, l'existence de coûts de virulence sécurise donc les économies de traitements permises par les scénarios S1 et S2.

Les différents scénarios ont également un effet sur le contrôle évolutif, c'est-à-dire sur la durabilité des VR déployées. Ainsi le scénario S1 procure le meilleur contrôle évolutif car il est associé à un déploiement massif des VR dès les premières années. Ce contrôle est bien meilleur que celui obtenu avec le déploiement progressif de S2 où la coexistence entre VS et VR pendant de nombreuses années favorise l'émergence du super-pathogène depuis les VS. La durabilité résulte en fait d'un équilibre entre plusieurs mécanismes : (i) la probabilité d'apparition de souches super-pathogènes (augmente avec la part du paysage cultivé avec des VS), (ii) la capacité des souches super-pathogènes à se maintenir sur des VS en compétition avec des souches sauvages (diminue avec les coûts de virulence), et (iii) la probabilité de dispersion d'une souche super-pathogène d'une VS vers une VR (maximale dans des paysages avec moitié de VS et de VR). Nos résultats montrent également que la durabilité, et en cascade les autres variables de sorties considérées, sont modulées par les caractéristiques particulières des paysages considérées. Ainsi, des proportions proches de VR conduisent à des différences de durabilité liées à la configuration spécifique des paysages de Buzet (taille des parcelles). Ces différences de configuration modifient le périmètre des longueurs de contact entre parcelles plantées avec des VS et celles plantées avec des VR, et donc les probabilités d'échanges de propagules infectieuses (*i.e.* spore) entre variétés.

Enfin, du point de vue économique, le déploiement de VR conduit à une augmentation des bénéfices nets par rapport au scénario de référence avec de larges différences entre scénarios. Ces différences relèvent en grande partie des économies de coût des traitements réalisées en lien avec la part des surfaces dédiées aux VR. Ainsi, le scénario S1 apporte la plus forte augmentation de bénéfice net (+36%). Les scénarios S2 et S4 apportent respectivement des augmentations de 10% et 9%. Les augmentations offertes par les 3 autres scénarios sont inférieures à 5%. Un second fait notable concerne les intervalles de confiance. À l'image de nos observations sur les traitements fongicides, les intervalles de confiance sont larges avec les scénarios S1 et S2, soit les scénarios les plus prometteurs en moyenne sur l'ensemble des critères considérés. Il s'agit encore une fois des conséquences des contournements de résistance. Deux processus impactent alors les résultats économiques. D'une part, les contournements annulent l'avantage des VR comme source de réduction du coût de la protection phytosanitaire. D'autre part, le surcoût actuel à l'achat des VR peut ne pas être compensé par les économies de traitement réalisées si les contournements arrivent rapidement après la plantation. Cette situation se produit notamment avec le scénario S2 (plantation progressive des VR).

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

Implications pratiques :

Projet MÉDÉE

L'objectif premier de ce travail était que les équipes d'une cave coopérative, acteurs du changement à l'échelle d'un territoire viticole, se saisissent de la question des variétés résistantes, de leur déploiement et de leur durabilité. Les ateliers participatifs furent en effet des espaces d'échange mutuellement bénéfiques entre professionnels de terrain, pour s'approprier les facteurs influençant la durabilité des résistances variétales, et chercheurs, pour préciser - voire modifier - leurs hypothèses de travail. La possibilité de réaliser en direct (via une interface web) des simulations de déploiement de variétés résistantes dans le parcellaire réel de Buzet a joué un rôle majeur de facilitation du dialogue. De même, le recours à des agences spécialisées dans l'animation d'ateliers participatifs, comme nous l'avons fait avec l'agence Think+, a permis à chaque participant de se centrer sur les fondamentaux de son métier pendant les échanges. Au cours des ateliers, les équipes de la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet" sont passés par plusieurs phases (notamment une phase d'idéation où leur créativité en termes de scénarios a été grande), pour aboutir à des scénarios de déploiement plus réalistes, bien que parfois en rupture avec le schéma de l'AOP. C'est aussi un des intérêts de la modélisation, *i.e.* s'auto-riser à dépasser les limites des systèmes de culture existants pour imaginer des scénarios en rupture.

Les ateliers ont débouché sur l'identification de deux scénarios de déploiement des variétés résistantes plus probables à court terme pour les acteurs de la cave coopérative, *i.e.* les scénarios basés sur la plantation des VR en ZNT. Leur mise en œuvre nécessiterait cependant que l'INAO valide la demande portée par la cave coopérative d'inscription des cépages résistants rouges Artaban et Vidoc dans le cahier des charges de l'AOP Buzet pour qu'elle puisse accompagner les viticulteurs dans leurs plantations. Au final, la cave coopérative aura ajusté ses choix de scénarios et le raisonnement sur sa stratégie d'innovation au fil des échanges et au regard des résultats fournis par le modèle. Elle aura montré sa capacité, en tant qu'entreprise qui porte un projet collectif au service de ses membres, à prioriser des scénarios privilégiant la protection de la durabilité des gènes de résistance et le contrôle des épidémies, et donc les besoins socio-économiques de ses membres à long terme. L'action collective de déploiement des VR menée à l'échelle de la coopérative - au départ organisation productive résultant sur la mise en commun de moyens et de ressources, mais aussi groupe de personnes formant une communauté de projet - pourrait donc être à l'origine d'une gouvernance effective des gènes de résistance.

Les ateliers ont également permis de mettre en évidence les freins et leviers à l'adoption des scénarios par les viticulteurs et les consommateurs. Au niveau des viticulteurs, les leviers mobilisables sont (i) la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires (avérée dans l'ensemble de nos simulations) et des résidus de pesticides dans les vins, (ii) l'amélioration des conditions de travail et (iii) l'enthousiasme de certains viticulteurs pour l'innovation. Au contraire, les doutes concernent (i) l'adaptation des variétés résistantes au changement climatique, (ii) la crainte de revenir aux stratégies de traitement habituelles en cas de contournement, (iii) la disponibilité des plants résistants, (iv) la réémergence de maladies classiquement maîtrisées par les traitements phytosanitaires (black-rot) et (v) les contraintes réglementaires liées aux VIFA qui limitent les possibilités de plantation, et donc les économies de traitement. Ce dernier point est toutefois modulé par la capacité des AOP à adapter leurs règles sur le temps long.

La demande joue également un rôle important pour l'acceptabilité des variétés résistantes. L'intérêt, voire le consentement à payer des consommateurs pour des vins nouveaux proposant de meilleures performances environnementales et sanitaires sera déterminant dans le choix des viticulteurs (Fuentes Espinoza *et al.*, 2018). La cave coopérative communique d'ores et déjà sur des produits innovants, notamment auprès des consommateurs locaux, en mobilisant la corde du locavorisme dans son magasin. Toutefois, plusieurs freins ont été identifiés par les consommateurs qui questionnent le potentiel de différenciation des vins produits à partir de ces cépages et l'information à délivrer sur les VR aux consommateurs : (i) un risque d'amalgame entre variétés résistantes (obtenues par un processus de sélection traditionnel basé sur des croisements) et organismes génétiquement modifiés, (ii) un risque de perte des consommateurs traditionnels, (iii) la difficulté de bénéficier de l'avantage du premier arrivé (*first mover advantage*), c'est-à-dire de l'avantage économique qu'obtiennent les acteurs qui adoptent une technologies avant les autres, si de nombreuses entreprises s'engagent dans cette démarche et (iv) une difficulté à valoriser ces nouveaux vins face à la multiplication des labels.

Recommandations :

Le projet a permis de donner de la visibilité aux gènes de résistance aux maladies en tant que biens communs matériels et d'en montrer la valeur en utilisant une démarche participative pour le déploiement des variétés résistantes. Mais ce n'est là qu'une première étape qui montre la nécessité de mettre en

Projet MÉDÉE

œuvre des approches participatives (living-lab) et pluridisciplinaires pour promouvoir une gestion partagée de la santé des plantes en donnant toute leur place aux sciences humaines et sociales. La question de l'échelle de mise en œuvre reste également posée. Si l'échelle territoriale, au sens de construit d'acteurs, a été explorée ici en superposition de l'échelle spatiale du paysage, restent également à développer des travaux de recherche où le territoire, en plus d'être un espace support, est un espace où sont traitées directement les questions de gouvernance de l'innovation, de coût pour l'agriculture à une échelle macroéconomique, et des outils d'intervention (échelle, financeurs), en complémentarité et dialogue avec les approches paysagères. Enfin, le projet s'est centré sur l'analyse des innovations variétales comme levier territorial pour réduire l'utilisation et les risques liés aux produits phytopharmaceutiques. Il ne s'agit que d'un levier parmi d'autres. Une approche intégrée multi-leviers étant nécessaire afin de pleinement répondre aux enjeux de l'appel à projets, il reste à construire des approches évaluatives intégrées par la recherche.

Limites ou généralisations éventuelles des résultats :

L'approche par modélisation mobilisée dans ces travaux s'appuie sur de solides bases mathématiques et sur les connaissances acquises en épidémiologie et sur l'évolution des agents phytopathogènes depuis les quatre dernières décennies (Rimbaud *et al.*, 2021ab). En s'affranchissant des contraintes logistiques, financières et légales associées à l'expérimentation dans les systèmes agricoles, la modélisation permet de comparer un ensemble de stratégies de déploiement de variétés résistantes sans prendre le risque d'épidémies désastreuses ou de contournements de résistance. Par ailleurs, en simplifiant une réalité complexe, un modèle est souvent généralisable à plusieurs situations comparables. Ainsi, les conclusions obtenues sur le territoire de Buzet sont très vraisemblablement transposables sur d'autres territoires viticoles, voire à la gestion d'agents pathogènes présentant des cycles épidémiques proches de celui du mildiou de la vigne. C'est par exemple le cas du phoma du colza, causé par le champignon *Leptosphaeria maculans*, dont le cycle est caractérisé par des phases de reproduction clonale durant la saison de culture du colza, entrecoupées par des événements de reproduction sexuée lors des intercultures. A l'instar du mildiou de la vigne, le phoma du colza est au cœur des enjeux sur la réduction des traitements phytosanitaires et la préservation des gènes de résistance.

Pour autant, les résultats d'une expérience (qu'elle soit numérique comme ici ou réalisée dans le monde réel) doivent être interprétés à la lumière des hypothèses sous-jacentes et des simplifications présupposées. Ainsi, le modèle *landsepi* ne considère pas les effets des variables environnementales (notamment météorologiques) bien qu'elles façonnent sur le court terme les dynamiques épidémiques. Nous nous focalisons uniquement sur les interactions entre les aspects épidémiologiques, évolutifs et économiques sur le long terme avec l'objectif de comparer les stratégies de déploiement "toutes choses étant égales par ailleurs". Nous supposons donc que l'effet des conditions météorologiques, en affectant de la même façon toutes les stratégies, ne changerait pas nos conclusions. Par contre, ces mêmes conclusions ne sont donc valides que dans le périmètre de cette hypothèse. Plus généralement, si la modélisation joue le rôle d'outil intégrateur des mécanismes de l'épidémiologie et de l'évolution qui se déroulent à des échelles spatiales et temporelles emboîtées (plantes, parcelles, paysage-territoire), elle ne peut pas tout. L'expérimentation et l'observation ont une place tout aussi importante pour informer, calibrer et tester les modèles. Ainsi, nos résultats sur la coexistence de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques montrent clairement le besoin d'études expérimentales pour préciser les valeurs de certains paramètres (probabilité de mutation phénotypique, coût de fitness) qui influencent très fortement l'issue probable de telles associations variétales.

Réalisations pratiques et valorisation :

Une bande dessinée retraçant les échanges lors des 4 ateliers conduit avec les équipes de la cave-coopérative de Buzet a été réalisée durant le projet par l'illustratrice Louise Plantin (Plantin *et al.*, 2024). Cette BD met en lumière la multiplicité des enjeux auxquels se confronte une coopérative dans l'optique du déploiement des variétés résistantes. Elle vulgarise également des notions de biologie et de modélisation appliquées à la création des variétés de vignes résistantes aux maladies et aux leviers à disposition des acteurs de terrain (viticulteurs, techniciens) pour les gérer durablement.

Le projet permettra *in fine* la publication de 3 articles scientifiques (deux étant déjà publiés à la date de remise de ce rapport). Il a également donné lieu à 8 communications dans des conférences scientifiques, et contribué à la formation d'un groupe d'étudiants de Bordeaux Sciences Agro.

Projet MÉDÉE

Partenariats mis en place, projetés, envisagés

Les simulations produites par *landsepi* sont sensibles à certains paramètres qu'il convient donc d'estimer le plus précisément possible par des expérimentations dédiées. Il s'agit en particulier des paramètres mesurant la fréquence de mutation des agents pathogènes vers des phénotypiques adaptés aux résistances et de ceux définissant la matrice d'interaction entre l'ensemble des variétés considérées (aussi bien sensibles que résistantes) et des pathotypes possibles d'agents pathogènes. Pour ces derniers, un travail utilisant les données de phénotypes des populations de mildiou recueillies sur l'observatoire OSCAR est actuellement en cours dans le cadre du projet ANR COMBINE.

Une perspective dans la droite lignée de ces travaux serait de généraliser ce type d'ateliers pour accompagner l'ensemble de la filière viticole vers l'acquisition des bonnes pratiques et des connaissances qui permettront d'exploiter au mieux et le plus durablement possible les variétés résistantes au mildiou. Pour cela, il est essentiel de proposer à la filière des supports de communication et de formation innovants. Un projet serait donc de développer sur la base du modèle *landsepi* un jeu dit "sérieux" proposé sur application web et/ou smartphone à l'enseignement (lycées agricoles, BTS, écoles d'ingénieurs), aux professionnels et au grand public.

Enfin, le projet a permis de travailler avec les acteurs de la cave coopérative, en tant que prescripteur pour les viticulteurs. Il reste toutefois à s'intéresser aux dispositifs d'accompagnement et de financement à mettre en œuvre pour aller au bout d'un tel projet (à ce titre, un dispositif de recherche-action, de type laboratoire d'innovation territoriale pourrait être envisagé). La question d'un coût privé (pour les viticulteurs qui planteront) pour un bénéfice collectif (préservation de la résistance à l'échelle de la coopérative) voire public (à l'échelle plus large de la viticulture) et donc des incitations reste en effet posée. Par exemple, la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet" a déjà déployé un Paiement pour Service Environnemental (PSE) dans le cadre du déploiement de la lutte par confusion sexuelle contre les vers de grappe sur son territoire. Un tel dispositif pourrait être testé en économie comportementale (révélation du consentement à recevoir). C'est ce qui sera testé dans le cadre du projet ANR COMBINE grâce à une expérience de choix (initialement prévue avec le même partenaire en continuité du projet Médée).

Projet MÉDÉE

Pour en savoir plus (quelques références)

L'ouvrage récent "L'immunité des plantes" réalise une synthèse complète des travaux en biologie, en modélisation et en sciences sociales sur ce qu'est l'immunité végétale et sur la manière dont elle pourrait concourir au développement de l'agroécologie.

Lannou C., Roby D., Ravigné V., Hannachi M., Moury B. 2021. L'immunité des plantes : pour des cultures résistantes aux maladies. Éditions Quæ, Coll. Savoir faire.

Bibliographie citée dans le rapport

Agreste, 2021. Enquête Pratiques Phytosanitaires en viticulture en 2019 : IFT et nombre de traitements. www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2019. Pratiques culturales en grandes cultures 2017 : IFT et nombre de traitements. www.agreste.agriculture.gouv.fr

Delmotte F., Fabre F., Miclot A.S., Paineau M., Schneider C., Delière L., 2021. Des vignes, des invasions et des résistances. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quæ, <https://hal.inrae.fr/hal-03130984>

Fabre F., Carpentier F., Papaïx J., Boixel A.-L., Berthier K., 2021. Diversifier les paysages cultivés : état des connaissances et perspectives de recherche. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quæ, <https://hal.inrae.fr/hal-03130984>

Fouillet E., Delière L., Chartier N., Munier-Jolain N., Cortel S., Rapidel B., Merot A., 2022. Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. European Journal of Agronomy, 136, 126503.

Fuentes Espinoza A., Hubert A., Raineau Y., Franc C., Giraud-Héraud E., 2018. Resistant grape varieties and market acceptance: an evaluation based on experimental economics. OENO One, 52(3). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.3.2316>

Gilligan C.A., 2008. Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences 363, 741–759. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2181>

Hannachi M., Coléno F., Bousset L., Delourme R., Chevre AM., Balesdent MH., Rouxel T., Pinochet X., Leflon M., Multeau C., Garmendia-Auckenthaler L., 2021. Vers une gestion des gènes de résistance comme des biens communs. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quæ

Ostrom E., 1990. Governing the commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Pp. 280

Paineau M., Mazet I. D., Wiedemann-Merdinoglu S., Delmotte F., Fabre F., 2022. The characterization of pathotypes in grapevine downy mildew provides insights into the breakdown of Rpv3, Rpv10 and Rpv12 factors in grapevines. Phytopathology, 112 (11), 2329-2340, <https://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-11-21-0458-R>

Paineau M., Minio A., Mestre P., Fabre F., Maze, I.D., Couture C., Legeai F., Dumartinet T., Cantu D., Delmotte F., 2024. Multiple deletions of candidate effector genes lead to the breakdown of partial grapevine resistance to downy mildew. New Phytol. <https://doi.org/10.1111/nph.19861>

Papaïx J., Berthier K., Fabre F., Moury B., Ravigné V., Rimbaud L., 2021. Écologie des interactions plante-bioagresseur. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quæ, <https://hal.inrae.fr/hal-03131072>

Plantin L., Miclot AS., Papaïx J., Rey JF., Rimbaud, L., Zaffaroni M., Alonso Ugaglia A., Fabre F., 2024. Les résistantes : Des vignes pas comme les autres. 2024. <https://hal.inrae.fr/hal-04604456>

REX Consortium, 2013. Heterogeneity of selection and the evolution of resistance. Trends Ecol Evol. 2013 Feb;28(2):110-8. doi: 10.1016/j.tree.2012.09.001

Projet MÉDÉE

Rimbaud L., Fabre F., Papaïx J., Moury B., Lannou C., Barrett L., Thrall P., 2021a. Models of plant resistance deployment. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 125-152, <https://dx.doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-122134>

Rimbaud L., Papaïx J., Fabre F., 2021b. Stratégies paysagères pour déployer efficacement et durablement la résistance : modèles et prédictions. In : *L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies*. Editions Quae. <https://hal.inrae.fr/hal-03131097>

Rimbaud, L., Papaïx, J., Barrett, L. G., Burdon, JJ., Thrall, PH., 2018b. Mosaics, mixtures, rotations or pyramiding: What is the optimal strategy to deploy major gene resistance? *Evolutionary Applications*, 11(10), 1791–1810.

Rimbaud, L., Papaïx, J., Rey, JF., Barrett, LG., Thrall, PH., 2018a. Assessing the durability and efficiency of landscape-based strategies to deploy plant resistance to pathogens. *PLoS Computational Biology*, 14(4), e1006067.

Savary, S., Delbac, L., Rochas, A., Taisant, G., Willocquet, L., 2009. Analysis of Nonlinear Relationships in Dual Epidemics, and Its Application to the Management of Grapevine Downy and Powdery Mildews. *Phytopathology* 99, 930–942. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-8-0930>

Ugaglia A., 2009. Pratiques de comptabilité analytique en viticulture : des coûts de production au coût des pratiques environnementales, *La Revue du Financier*, n°176, mars-avril 2009.

Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey J-F., Papaïx J., Fabre F., 2024a. Effects of pathogen reproduction system on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major resistance genes in agricultural landscapes. *Evolutionary Applications*, 17 (1), pp.e13627. <https://dx.doi.org/10.1111/eva.13627>

Zaffaroni M., Papaïx J., Rimbaud L., Geffersa A., Rey JF., Fabre F., 2024b. Combining single-gene-resistant and pyramided cultivars in agricultural landscape compromises the benefits of pyramiding in most, but not all, productions situation. A paraitre dans *Phytopathology*, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-24-0075-R>

Zhan, J., Thrall, PH., Papaïx, J., Xie, L., Burdon, JJ., 2015. Playing on a Pathogen's weakness: Using evolution to guide sustainable plant disease control strategies. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 19–43.

Projet MÉDÉE

Liste des opérations de valorisations issues du contrat (articles de valorisation, participation à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey JF., Papaïx J., Fabre F., 2024. Effects of pathogen reproduction system on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major resistance genes in agricultural landscapes. <i>Evolutionary Applications</i>, 17 (1), pp.e13627. https://dx.doi.org/10.1111/eva.13627 Zaffaroni M., Papaïx J., Rimbaud L., Geffersa A., Rey JF., Fabre F., 2024. Combining single-gene-resistant and pyramided cultivars in agricultural landscape compromises the benefits of pyramiding in most, but not all, productions situation. A paraître dans <i>Phytopathology</i>, https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-24-0075-R
Publications scientifiques à paraître	
Publications scientifiques prévues	Zaffaroni M., Fabre F., Miclot AS., Rimbaud L., Papaïx J., Rey JF., Alonso Ugaglia A., <i>en cours de rédaction</i>. Deployment of resistant grapevines decreases fungicide treatments and increases net benefit of a cooperative winery: insights from a participative science project.
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	Zaffaroni M., Rey JF., Rimbaud, L., Papaïx, J., Fabre, F. <i>Disentangling the effects of genetic recombination and dormancy linked to pathogen sexual reproduction on the effectiveness and durability of resistance deployment strategies</i>. Présenté à : Petit Pois Dérivé 2022, 30 mai- 1 juin 2022 Villeneuve d'Ascq (France). Poster. Zaffaroni M., Miclot AS., Paneau M., Demeaux I. , Bourg J., Couture C., Delière L., Delmotte F., Fabre, F. Genotypes x genotypes cross-inoculation experiments to assess the effectiveness of grapevine resistance factors Rpv1 and Rpv3 to <i>Plasmopara viticola</i>, the grapevine downy mildew agent. Présenté à : Petit Pois Dérivé 2022, 30 mai- 1 juin 2022 Villeneuve d'Ascq (France). Poster. Rimbaud L., PapaïxJ., ReyJF., Gaussen J. L., Zaffaroni M., Fabre F. <i>Modelling plant resistance deployment : the R package landsepi</i>. Présenté à : 15th International Symposium of Plant Virus Epidemiology, 5-8 juin 2022, Madrid (Espagne). Poster. Zaffaroni M., Rey JF., Rimbaud, L., Papaïx, J., Fabre, F. <i>Disentangling the effects of pathogen sexual reproduction on the effectiveness and durability of resistance deployment strategies: Plasmopara viticola as a case study</i>. Présenté à : International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildews (GDPM 2022), 20-22 juillet 2022, Cremona (Italie). Présentation orale. Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey JF., Fabre F., Papaïx J., 2023. <i>Effects of pathogen sexual reproduction on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major re-</i>

Projet MÉDÉE

	<i>sistance genes in agricultural landscapes</i>. Présenté à : 12th International congress of plant pathology (ICPP), Lyon, France. Présentation orale. Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaïx J., Rey J.-F., Deliere L., Miclot A.-S., Alonso Ugaglia A., Fabre F., 2023. <i>Epidemiological, evolutionary and economic outcomes associated to the coexistence of monogenic and pyramided resistant cultivars in agricultural landscapes: a case study with the management of downy mildew in wine growing areas</i>. Présenté à : 12th International congress of plant pathology (ICPP), Lyon, France. Poster. Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaïx J., Rey J.-F., Delière L., Miclot AS., Alonso Ugaglia A., Fabre F., 2024. Multicriteria evaluation of landscape strategies to deploy monogenic and pyramided resistances against grapevine downy mildew. Présenté à : Journée Jean Chevaugeon, 15-19 janvier 2024, Aussois. Présentation orale. Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaïx J., Rey JF., Delière L., Miclot AS., Alonso Ugaglia A., Fabre F., 2024. Multicriteria evaluation of landscape strategies to deploy monogenic and pyramided resistances against grapevine downy mildew. Présenté à : Journée du projet PPR VITAE, 12-13 mars 2024, Cognac. Présentation orale.
Participations futures à des colloques	
THÈSES	
Thèses passées	
Thèses en cours	
ARTICLES DE VALORISATION/ VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	Une BD de vulgarisation de la démarche : Plantin L., Miclot AS., Papaïx J., Rey JF., Rimbaud L., Zaffaroni M., Alonso Ugaglia A., Fabre F., 2024. Les résistantes : des vignes pas comme les autres. Disponible ici : https://hal.inrae.fr/hal-04604456
Articles de valorisation à paraître	Fabre F., Miclot AS., Rimbaud L., Zaffaroni M., Papaïx J., Rey JF., Alonso Ugaglia A., <i>soumis</i>. Vers des mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le déploiement des cépages résistants. Soumis à Innovations Agronomiques
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MÉDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	
Actions vers les médias prévues	Communiqué de presse à l'occasion de la sortie de la BD

Projet MÉDÉE

ENSEIGNEMENT/ FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	Organisation, animation et participation aux 4 ateliers de travail avec la cave coopérative “Nous, les Vignerons de Buzet” pour co-construire des stratégies de déploiement des variétés de vignes résistantes sur leurs territoires (4 ateliers d’une matinée chacun en 2023 : 24 janvier, 9 mars, 4 avril et 17 mai. Ecole-chercheur intervention sous forme de cours et TD (2h) “Strategies for cultivar deployment in agricultural landscapes: confronting the points of view of breeders and farmers” par Marta Zaffaroni et Frédéric Fabre à l’occasion de l’école chercheur du réseau COST TOP AGRI "Rethinking plant breeding for a zero-pesticide agriculture" (13-15 mai 2024, INRAE Bordeaux) Formation d’étudiants ingénieurs agronomes (2e année Bordeaux Sciences Agro) : 4 étudiants qui ont été sensibilisés et formés à l’enjeu du déploiement des variétés résistantes (projet de 5 semaines, avec enquêtes auprès des clients du magasin de la cave coopérative “Nous, les Vignerons de Buzet” sur l’acceptabilité des variétés résistantes en vente directe, et de viticulteurs) en 2023 → un rapport de projet.
Enseignements/formations prévus	
EXPERTISES	
Expertises menées	Analyse sociologique de Gautier Sabria (rapport)
Expertises en cours	
Expertises prévues	
MÉTHODOLOGIES (GUIDES...)	
Méthodologies produites	
Méthodologies en cours d’élaboration	
Méthodologies prévues	
AUTRES	
LOGICIEL (package R)	Mise à disposition du modèle mathématique <i>landsepi</i> couplant modèle biophysique et économique dans un package R et une interface web. La nouvelle version du package R incluant notamment le paramétrage mildiou de la vigne est disponible sur le site du CRAN (https://cran.r-project.org/web/packages/landsepi/index.html).

Projet MÉDÉE

Résumés

☐ Résumé court

(5 lignes maximum)

Le modèle mathématique *landsepi* a été adapté pour simuler le déploiement de variétés de vigne résistantes au mildiou et a permis d'évaluer l'effet sur la gestion des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction des traitements fongicides et les bénéfices nets de différents scénarios de déploiement co-construits sur le territoire de la coopérative de Buzet. La coexistence de variétés portant des résistances monogéniques et polygéniques a également été testée dans des paysages simplifiés.

Projet MÉDÉE

□ Résumé long

2 pages reprenant les rubriques de la synthèse – À mettre à jour par rapport à votre projet initial :

- Contexte général et enjeux scientifiques et techniques :

Réduire l'usage des fongicides est un enjeu majeur en viticulture, en particulier vis-à-vis des traitements ciblant le mildiou et l'oïdium, ces maladies entraînant près de 80% des traitements phytosanitaires sur cette culture. Les variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium sont une des innovations les plus prometteuses dans cet objectif. Depuis 2018, les premières variétés résistantes sont disponibles ; de nombreuses autres sont à venir. Un enjeu fort de leur déploiement concerne la durabilité de leurs résistances. En effet, les choix variétaux des viticulteurs conditionnent l'adaptation des bioagresseurs et donc la durabilité des résistances. Pour les maladies à dispersion éolienne, les stratégies de déploiement doivent être réfléchies à l'échelle du territoire car leurs dispersions à longue distance implique une nécessaire coordination entre acteurs.

- Objectifs

Ce projet utilise la modélisation mathématique comme outil pour aider au déploiement de variétés résistantes en viticulture et en évaluer l'effet sur la gestion des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction des traitements fongicides et les bénéfices nets à différentes échelles. Il s'agit notamment de rechercher des organisations spatiales concertées de la mosaïque territoriale assurant la performance économique des exploitations tout en préservant l'efficacité des résistances, et ce sur un parcellaire réel, celui de la cave coopérative "Nous, les Vignerons de Buzet".

- Méthodologie

Le projet repose sur (i) l'adaptation du modèle *landsepi* à des cycles de vie d'agents pathogènes caractéristique du mildiou de la vigne, (ii) sa paramétrisation au cas du mildiou à partir de la bibliographie et de données expérimentales acquises dans le réseau OSCAR, (iii) l'intégration dans *landsepi* d'une fonction de coût permettant de conduire des analyses coûts-bénéfices aux échelles parcellaire, exploitation et territoire, et (iv) l'organisation d'ateliers participatifs avec la coopérative de Buzet pour co-construire et évaluer des scénarios de déploiement des cépages résistants sur ce territoire en accord avec sa stratégie et ses enjeux. La crise du covid a retardé le début effectif du projet au 1^{er} janvier 2021.

- Principaux résultats obtenus

Trois principaux résultats ont été obtenus :

- **Un modèle pour simuler des stratégies de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans les territoires viticoles.** Le modèle *landsepi*, initialement développé pour le déploiement de variétés de blé résistantes à la rouille et pour simuler la propagation et l'évolution d'un agent pathogène dans un paysage agricole avec des variétés résistantes et sensibles a été adapté. Nous avons tout d'abord inclus la possibilité de simuler un régime de reproduction mixte pour les agents pathogènes alternant des phases asexuées pendant la saison de culture, et une phase sexuée en automne/hiver (régime de reproduction caractéristique du mildiou de la vigne). Nous avons ensuite proposé un paramétrage spécifique pour le mildiou de la vigne. Par la suite, nous avons ajouté un module simulant l'effet de traitements fongicides sur le contrôle épidémiologique, les traitements étant déclenchés en fonction d'un seuil de sévérité de la maladie. Cette fonctionnalité permet désormais de calculer les indices de fréquences de traitement (IFT). Pour finir, nous avons introduit un module d'analyse coût-bénéfice des stratégies de déploiement à trois échelles (parcelle, exploitation, territoire).
- **La coexistence dans un territoire de variétés à résistance monogénique avec des variétés à résistances polygéniques compromet la durabilité.** Ce résultat de modélisation suggère que, dans la plupart des configurations analysées, l'efficacité et la durabilité des variétés pyramisant les gènes Rpv3 et Rpv1 sont compromises dès lors qu'elles sont cultivées, même en faible proportion, avec des variétés à résistance monogénique portant uniquement Rpv3 ou Rpv1.
- **Évaluation et comparaison de stratégies de déploiement des variétés résistances dans le territoire de l'AOP Buzet.** Lors de 4 ateliers participatifs avec la cave coopérative "Nous, les Vignerons

Projet MÉDÉE

de Buzet", le modèle a été utilisé comme support pour sensibiliser les acteurs à la durabilité des variétés résistantes. Des approches de facilitation ont été mobilisées pour identifier, avec les équipes de la cave coopératives et en accord avec leur stratégie globale, six scénarios de déploiement à tester sur leur territoire. Les scénarios, simulés sur le parcellaire réel de Buzet, ont été comparés et discutés pour leurs capacités à contrôler le mildiou, à favoriser la durabilité des résistances, à réduire les traitements fongicides et améliorer les marges économiques tant au niveau des exploitations que de la coopérative. Au final, la cave coopérative aura ajusté ses choix de scénarios et le raisonnement sur sa stratégie d'innovation au fil des échanges et au regard des résultats fournis par le modèle.

- Sorties opérationnelles pour décideurs, applications éventuelles

La possibilité de réaliser en direct des simulations de déploiement de variétés résistantes dans un parcellaire réel a joué un rôle majeur de facilitation pour sensibiliser les acteurs du projet aux enjeux de la durabilité des résistances. L'utilisation de la modélisation a permis aux équipes de la cave coopérative une grande créativité depuis des scénarios réalistes jusqu'à des scénarios en rupture qui dépassaient les limites des systèmes de culture existants. Les ateliers ont débouché *in fine* sur l'identification de deux scénarios de déploiement des variétés résistantes plus probables à court terme pour les acteurs de la cave coopérative, avec plantation en ZNT, mais leur mise en œuvre nécessiterait la modification du cahier des charges de l'AOP. Au final, la cave coopérative aura ajusté ses choix de scénarios et sa stratégie d'innovation au fil des résultats fournis par le modèle. Il s'agit donc d'un outil qui pourrait être mobilisé de la sorte sur d'autres territoires pour définir des stratégies de déploiement optimales. La cave coopérative aura également montré sa capacité, en tant qu'entreprise qui porte un projet collectif au service de ses membres, à prioriser des scénarios privilégiant la protection de la durabilité des gènes de résistance et le contrôle des épidémies, et donc les besoins socio-économiques de ses membres à long terme. L'action collective de déploiement des variétés résistantes menée à l'échelle d'une coopérative pourrait donc être à l'origine d'une gouvernance effective des gènes de résistance. Toutefois, l'efficacité de tels scénarios pour la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires reste limitée par la réglementation VIFA dans un contexte de viticulture AOP.

- Recommandations

De ce projet ressortent différentes recommandations, notamment sur les échelles d'analyse à considérer pour compléter les résultats obtenus : analyses intégrées multi-leviers, analyses à l'échelle territoriale des construits d'acteurs, en se focalisant sur les dispositifs de gouvernance, d'accompagnement et d'incitations à l'innovation ; mais également sur les freins et leviers associés au déploiement des variétés résistantes, tant au niveau de l'offre que de la demande.

□ Mots-clés

Variétés résistantes, durabilité des résistances, mildiou, vigne, modélisation d'accompagnement, modélisation mathématique, territoire, analyse coût-bénéfice, ateliers de co-construction, cave coopérative

Projet MÉDÉE



RAPPORT SCIENTIFIQUE

Dans le rapport scientifique, nous vous prions de fournir des éléments méthodologiques présentés succinctement et clairement afin de pouvoir avoir une vision des limites des résultats

Vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modÉlisation à la concertation territoriale pour le DÉploiEmEnt des cépages Résistants (MÉDÉE)

« Ecophyto II : Leviers territoriaux pour réduire l'utilisation et les risques liés aux produits phytopharmaceutiques »

Rapport final Vn [Adeline Alonso Ugaglia, Marta Zaffaroni, Anne-Sophie Miclot, Loup Rimbaud, Julien Papaix, Jean-François Rey, Frédéric Fabre]

Date de la version du rapport : 15/ 07/ 2024

Coordonnées du laboratoire : UMR INRAE 1065 SAVE – Centre INRAE Bordeaux Nouvelle Aquitaine - 71, Avenue Edouard Bourlaux – CS 20032 – 33882 Villenave d'Ornon cedex

Identité et coordinateur du projet de recherche : Frédéric FABRE (frederic.fabre@inrae.fr / 05 57 12 26 42) et Adeline ALONSO UGAGLIA (adeline.ugaglia@inrae.fr)

Action pilotée par les Ministères chargés de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de la l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+

Projet MÉDÉE

Note importante

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier PDF de préférence). Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

1. Introduction

1.1 Contexte général et enjeux scientifiques et techniques

La gestion des populations de bioagresseurs dans la majorité des systèmes agricoles actuels est fortement dépendante des produits phytosanitaires, notamment sur certaines cultures pérennes telles que la vigne. Ainsi, l'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen pour les vignobles français était de 12.4 en 2019, alors que celui du blé, qui occupe plus du quart de la surface des terres arables en France, était de 4,9 en 2017 (Agreste 2019, 2021). Cette situation résulte principalement de deux maladies fongiques, l'oïdium et le mildiou, qui représentent près de 80% des pesticides utilisés sur vigne (Fouillet *et al.*, 2022). La réduction de l'utilisation des pesticides est donc un enjeu clé pour la durabilité de la viticulture et pour répondre aux fortes attentes sociétales concernant la préservation de l'environnement et la santé humaine.

L'adoption des variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium est à cet égard une innovation prometteuse (Figure 1). Un des enjeux du déploiement des variétés résistantes réside dans la gestion de la durabilité des résistances. En effet, tout comme l'utilisation des antibiotiques favorise la sélection de bactéries résistantes, cultiver des variétés résistantes favorise la sélection d'agents pathogènes capables de contourner les gènes de résistances aux maladies d'autant plus rapidement que ces variétés sont largement cultivées. L'immunité végétale est donc fragile, et une variété résistante peut être soumise à un risque de surexploitation si elle conquiert une large portion de la sole cultivée. En ce sens, il existe une forme de rivalité pour l'usage des variétés résistantes. Par ailleurs, elles sont librement disponibles auprès des agriculteurs voulant les cultiver : impossible d'exclure de potentiels utilisateurs. Ces deux critères (rivalité et non-exclusivité) font des gènes de résistance un type de bien économique appelé bien commun (Hannachi *et al.*, 2021). Depuis les travaux d'Ostrom (1990), récompensée par le prix Nobel d'économie en 2009, il est reconnu que les biens communs peuvent être gérés durablement par des acteurs locaux en situation de concurrence via des organisations collectives partageant des intérêts et développant des stratégies et outils de gestion communs.

Les sélectionneurs, qui créent les variétés, et les agriculteurs (et leurs organisations collectives) qui les déploient, disposent chacun de plusieurs leviers d'actions pour gérer la durabilité des résistances. L'obtention de variétés résistantes pyramidées, c'est-à-dire cumulant plusieurs facteurs de résistances, est un levier à disposition des sélectionneurs pour favoriser la durabilité des résistances (REX Consortium, 2013). Cette stratégie est à l'origine du programme ResDur conduit par INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) depuis le début des années 2000. Il visait à sélectionner des variétés de vigne cumulant plusieurs gènes de résistances à l'oïdium et au mildiou. Les quatre premières variétés pyramidées obtenues par INRAE et l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin), dénommées Artaban, Floréal, Voltis et Vidoc, sont disponibles et inscrites au catalogue national depuis 2018. Elles cumulent notamment les gènes de résistance au mildiou Rpv1 et Rpv3 (Paineau *et al.*, 2022). La même année, d'autres variétés résistantes issues de programmes européens plus anciens et ne disposant que du gène Rpv3 ont également été autorisées (résistance monogénique).

Projet MÉDÉE

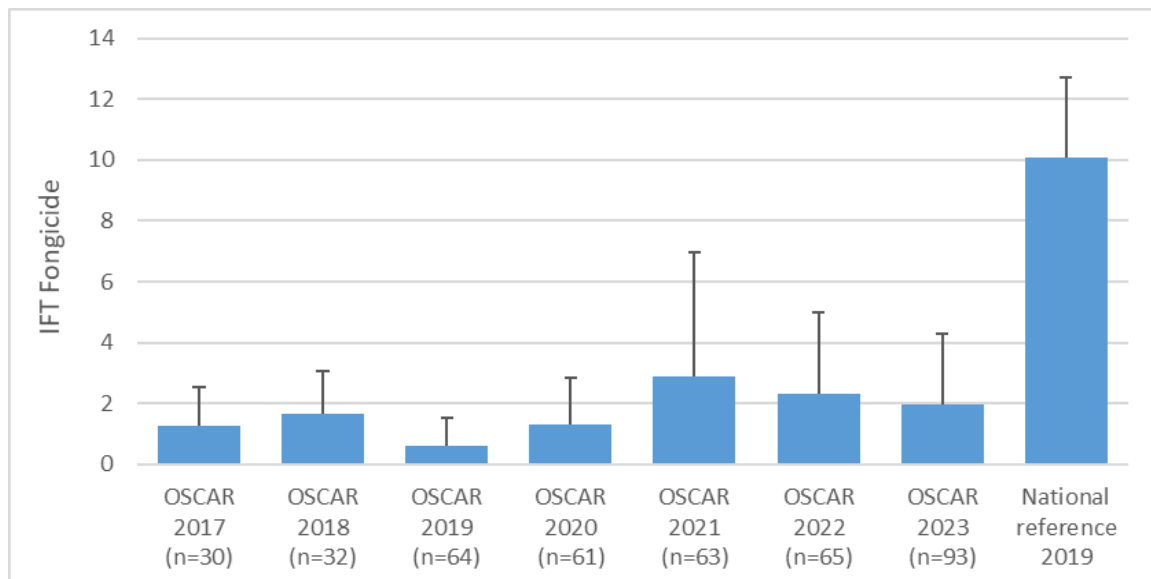


Figure 1 : Moyenne et écart-type de l'indicateur de fréquence de traitements (IFT) fongicides calculés sur les parcelles de l'Observatoire national du déploiement des Cépages Résistants (OSCAR). Ces parcelles sont toutes en production et cultivées avec des variétés résistantes. Le nombre de parcelles utilisées est indiqué pour chaque année de 2017 à 2023. La référence nationale 2019 correspond à l'IFT fongicide sur des parcelles conduites avec des cépages sensibles (source Agreste).

Les agriculteurs disposent également de plusieurs leviers pour promouvoir une gestion durable des résistances, notamment au travers des choix variétaux qu'ils opèrent lors de la plantation des parcelles au vignoble. Ces choix de variétés sont importants car ils conditionnent directement la dynamique d'adaptation des bioagresseurs et donc la durabilité des résistances (Zhan *et al.*, 2015). L'importance des choix de plantation est encore accrue lorsque, comme dans notre cas d'étude, ils s'opèrent sur des variétés partageant certains facteurs de résistances. Ainsi, en 2023, 2280 ha du vignoble français étaient plantés avec des variétés résistantes. Si la moitié de ces plantations concerne des variétés cumulant les gènes Rpv1 et Rpv3, 1% concerne des variétés possédant Rpv3 uniquement et 1,3% des variétés avec Rpv1 uniquement (Jacques Gautier, INAO, comm. pers.). Plus encore, les choix d'aujourd'hui vont conditionner le succès des futures générations de variétés résistantes qui cumuleront cette fois trois facteurs de résistance au mildiou et à l'oïdium, ainsi que le succès des programmes de sélection des variétés résistantes à typicité régionale (programme Newwine porté l'IFV). Pour finir, nous ne sommes qu'au tout début du déploiement de ces variétés. Cette situation est une opportunité unique pour mettre en place une stratégie de déploiement efficace visant à gérer sur le long terme l'efficacité des variétés résistantes.

Dans le cas des maladies aériennes telles que le mildiou, les stratégies de déploiement des variétés résistantes doivent être réfléchies à l'échelle des territoires viticoles tout d'abord pour des raisons biologiques (Gilligan, 2008). En effet, les propagules infectieuses des agents pathogènes à dispersion aérienne (spores, vecteurs biologiques tels que les insectes) se dispersent très souvent à des distances bien supérieures à la taille des parcelles, faisant du paysage une échelle pertinente pour leur gestion face à l'étendue des surfaces en jeu (typiquement un bassin de production) et aux durées nécessaires pour observer l'adaptation des agents pathogènes (typiquement plusieurs années). L'expérimentation au sens classique est inopérante pour comparer des stratégies de déploiement à ces échelles. Il s'avère utile de se tourner vers la modélisation mathématique qui fournit des outils de prospective stratégique permettant par exemple de simuler les conséquences d'une vaste gamme de stratégies possibles de déploiement de variétés résistantes (Rimbaud *et al.*, 2021ab). En outre, la modélisation a des vertus pédagogiques permettant de sensibiliser les acteurs à la notion de durabilité des résistances et d'expliquer les mécanismes biologiques à l'œuvre.

L'échelle du paysage devient territoriale dès lors qu'interviennent les acteurs sociaux, économiques et institutionnels. Le territoire est en effet un construit social entre un paysage et des acteurs. Il est aussi l'échelle naturelle d'organisation et d'intervention d'une coopérative, où sont prises des décisions aussi bien individuelles que collectives, pour des stratégies gagnant-gagnant. De par leur rôle de conseil et d'accompagnement de leurs membres, les coopératives peuvent donc être considérées comme des organisations en capacité de garantir une gestion collective et durable des variétés résistantes aux

Projet MÉDÉE

maladies. À cet égard, elles s'apparentent à une forme d'organisation collective capable de gérer des biens communs au sens d'Ostrom (1990).

Enfin, la plantation des variétés de vigne résistantes aux maladies répond également à un cadre réglementaire, notamment dans les vins produits en Appellation d'Origine Protégée (AOP) qui représentent 51% du vignoble en France. Les variétés résistantes peuvent désormais intégrer à titre expérimental le cahier des charges des AOP en tant que Variétés d'Intérêt à des Fins d'Adaptation (VIFA). Afin de maîtriser les conséquences de l'introduction des VIFA dans les vins commercialisés sous AOP, la procédure prévoit que le bénéfice de l'AOP puisse être maintenu aux conditions suivantes : (i) une limitation à 5 % des surfaces de l'encépagement d'une exploitation agricole, et (ii) une incorporation dans les assemblages de vins commercialisés sous AOP limitée à 10 % d'une structure. La période d'observation des expérimentations est fixée à 10 ans minimum à la suite de laquelle les variétés pourront être définitivement intégrées au cahier des charges, retirées du cahier des charges, ou la période d'observation est prolongée de 5 ans (au choix des AOP).

1.2 Objectifs généraux du projet

Ce cadre et ces enjeux sont à la base des trois objectifs du projet Médée « vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le DÉploiement des cépages Résistants ». Dans la première partie du projet, nous avons développé un modèle mathématique couplant mécanismes biophysiques de l'épidémiologie et analyses économiques pour simuler des scénarios de déploiement de variétés portant des résistances monogéniques et polygéniques au mildiou dans des territoires viticoles. Le modèle développé permet d'évaluer les effets de différents scénarios de déploiement sur le contrôle des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction du nombre de traitements fongicides et leurs performances économiques multi-échelles (parcelle, exploitation, territoire).

Dans la deuxième partie du projet, motivé par la possibilité désormais offerte aux viticulteurs de planter des variétés portant la seule résistance Rpv3 aux côtés de variétés portant à la fois Rpv1 et Rpv3, nous avons utilisé le modèle développé pour explorer de manière théorique les effets de cette coexistence potentielle de variétés monogéniques et polygéniques dans des paysages agricoles simplifiés.

Enfin, nous avons travaillé sur le territoire et le parcellaire de la cave coopérative "Nous, les vignerons de Buzet" (AOP Buzet), avec ses équipes, pour co-construire, évaluer et comparer un ensemble de scénarios collectifs de déploiement des vignes résistantes au mildiou répondant à la vision stratégique des acteurs.

2. Méthodologies

2.1 Modèle *landsepi*

Le projet s'est appuyé sur un modèle mathématique pré-existant, le modèle *landsepi* «Landscape Epidemiology and Evolution», développé à INRAE par les unités BioSP et Pathologie Végétale (centre d'Avignon), en collaboration avec le CSIRO (centre de Canberra, Australie) (Rimbaud *et al.*, 2018a). Il repose sur une architecture SEIR qui distingue plusieurs catégories de plantes (ou de parties de plante, typiquement des feuilles) en fonction de leur état sanitaire : sain (S), latent (E), infectieux (I), inactif (R) (au sens épidémiologique). Ce modèle est par ailleurs un modèle spatio-temporel, démogénétique et stochastique. Il simule la propagation et l'évolution d'un agent pathogène dans un paysage agricole suite au déploiement d'une ou plusieurs variétés résistantes. Ce faisant, il est possible de comparer un ensemble de stratégies de déploiement selon des critères épidémiologiques (santé des plantes), évolutifs (durabilité des résistances), et économiques (rentabilité des systèmes de production), mais également de mesurer l'impact de l'organisation du paysage, du contexte épidémio-évolutif et du pathosystème considéré sur la performance des stratégies (Rimbaud *et al.*, 2018b). Programmé en langages R et C, il peut être installé et utilisé librement grâce au package R du même nom (<https://CRAN.R-project.org/package=landsepi>). Au début du projet Médée, le modèle *landsepi* était paramétré pour les rouilles des céréales (causées par les champignons du genre *Puccinia*).

Projet MÉDÉE

2.2 Ateliers participatifs pour co-construire des stratégies de déploiement sur le territoire de la cave coopérative “Nous, les vignerons de Buzet”

Le projet s’est également appuyé sur le territoire de l’Appellation d’Origine Protégée viticole de Buzet grâce à un partenariat avec la cave coopérative “Nous, les vignerons de Buzet”. Cette AOP, obtenue en 1973, est située en Lot-et-Garonne (47) autour de la commune de Buzet-sur-Baïse, dans les environs d’Agen. Délimitée par la Garonne au nord et à l’est, et par le massif forestier des Landes à l’ouest, son territoire s’étend sur 27 communes et compte approximativement 3800 parcelles en production (Figure 2). Fondée en 1953, la cave coopérative regroupe la majorité des producteurs de l’AOP (160 producteurs en 2023) sur 1935 ha de vigne, soit 95% de la production de l’AOP. De par son rôle prescripteur, la coopérative assure, via son cahier des charges, une certaine homogénéité des pratiques (95% du vignoble certifié HVE, AB ou en conversion depuis 2020), des coûts de production et une politique commune de valorisation des produits. En 2020, la production était d’environ 13 millions de bouteilles.

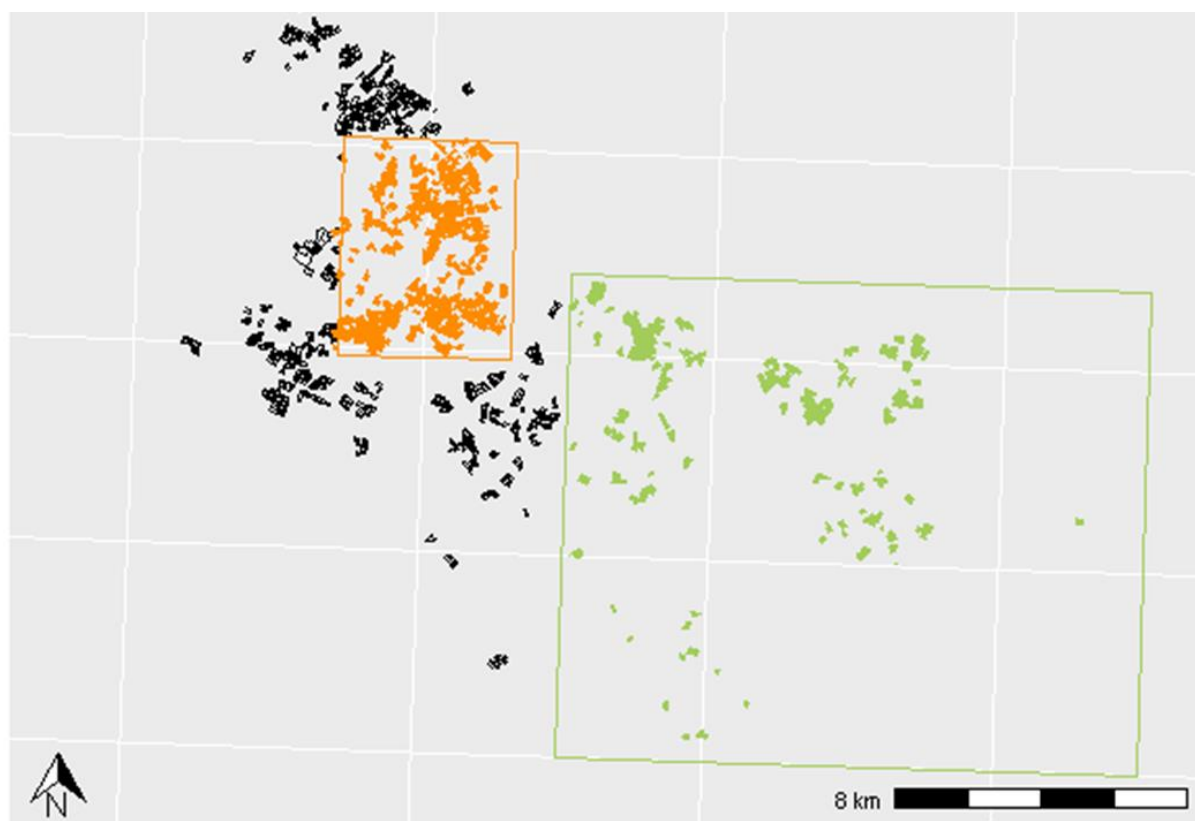


Figure 2 : Carte du parcellaire viticole de l’AOP Buzet. Deux paysages ont été considérés au sein de ce territoire comme support pour les simulations. Le paysage “Coeur du vignoble” correspond à la zone centrale du territoire (en orange). Il comprend 1422 parcelles (surface moyenne 0.46 ha) et 57 agriculteurs. Le paysage “Vignoble faible densité” correspond à une zone périphérique (en vert). Il comprend 709 parcelles (surface moyenne 0.56 ha) et 36 agriculteurs

Un travail de co-construction de scénarios collectifs de déploiement des variétés de vignes résistantes au mildiou a été conduit avec les équipes de la cave coopérative. Il a pris la forme d’une série de 4 ateliers organisés sur une base mensuelle (janvier-juin 2023) dans les locaux de la coopérative. Les ateliers se sont déroulés en présence du directeur de la cave coopérative, des responsables des différents services (vigne, marketing, recherche et innovation) de la coopérative, des chercheurs de l’équipe INRAE (épidémiologie, modélisation biomathématique, pathologie végétale, développement informatique, économie) sous le regard d’un sociologue indépendant avec une mission d’observation, et d’une illustratrice pour la facilitation graphique. L’animation a été confiée au cabinet d’éco-conception Think+, déjà partenaire de la cave coopérative dans le cadre de la définition de sa stratégie durable.

Projet MÉDÉE

Le premier atelier a eu pour thème la “Compréhension des enjeux et partage des objectifs” de l’entreprise. Il a permis à l’équipe de recherche de se familiariser avec la structure, ses enjeux et le contexte de la filière viticole. Le modèle *landsepi* a été présenté et a servi de support pédagogique pour l’appropriation de la question du déploiement des variétés résistantes par les acteurs de la coopérative, notamment concernant la nécessité de raisonner le déploiement de ces variétés à l’échelle du paysage, à celle du territoire et donc à une échelle collective, en utilisant son parcellaire comme support de réflexion.

Lors du deuxième atelier, des approches de facilitation ont été mobilisées pour identifier avec les équipes de la cave coopérative un ensemble de deux fois six scénarios exploratoires de déploiement à simuler sur leur parcellaire. Ces scénarios répondent aux objectifs stratégiques des acteurs de la cave coopérative (par exemple replanter avec des variétés résistantes les parcelles âgées de plus de 30 ans jusqu’à 5 % de surface/exploitation, planter ces variétés dans les Zones Non Traitées aquatiques, etc.).

Les résultats des scénarios exploratoires ont été présentés lors du troisième atelier, comparés et discutés pour leurs capacités à contrôler le mildiou, à favoriser la durabilité des résistances, à réduire les traitements fongicides et améliorer les bénéfices économiques tant au niveau des exploitations que de la cave coopérative. Ces résultats ont permis d’éliminer certains scénarios et d’en préciser d’autres pour aboutir au final à six scénarios préférentiels (Tableau 1) à tester et à comparer au statu quo, soit un scénario sans introduction de variétés résistantes où les parcelles continuent d’être renouvelées avec les variétés sensibles cultivées classiquement dans l’AOP.

Le quatrième et dernier atelier a permis d’approfondir les discussions autour des six scénarios sélectionnés, de travailler autour de leur acceptabilité pour les acteurs (viticulteurs, cave) et de produire une synthèse.

3. Résultats

3.1 Développement d’un modèle pour simuler des stratégies de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans les territoires viticoles

La première étape du projet a consisté à rajouter 4 fonctionnalités au modèle *landsepi*. Il s’agit en premier lieu de deux fonctionnalités relatives à la biologie en permettant qu’un agent pathogène intègre dans son cycle de vie des étapes de reproduction sexuée et en proposant des valeurs de paramètres spécifiques du mildiou de la vigne. En second lieu, pour faciliter le dialogue et l’appropriation du modèle par les techniciens et les viticulteurs, il s’agit de l’ajout d’un module simulant l’effet des traitements fongicides sur les épidémies, et d’un module d’analyse économique (coût/bénéfice) des stratégies de déploiement.

Ajout de la reproduction sexuée. Le modèle *landsepi*, initialement développé pour le déploiement de variétés de blé résistantes aux rouilles, ne représentait pas les régimes mixtes de reproduction d’agents pathogènes comme le mildiou de la vigne qui alterne entre des phases asexuées pendant la saison de culture, et une phase sexuée en automne/hiver. L’architecture du modèle a donc été modifiée afin qu’il puisse rendre compte de ce cycle de vie typique de nombreux agents pathogènes des climats tempérés (Figure 3).

Suite à ces développements, nous avons conduit une première étude théorique visant à mieux comprendre l’effet de la recombinaison génétique (spécifique des phases sexuées de reproduction) sur les conséquences évolutives et épidémiologiques des quatre principales stratégies de déploiement de deux gènes majeurs de résistances (pyramidage, rotation, mélange et mosaïque) (Zaffaroni *et al.*, 2024a). Nos résultats montrent que l’établissement des « super-pathogènes », c’est-à-dire des agents pathogènes contournant l’ensemble des variétés résistantes présentes dans un paysage, est favorisé par la recombinaison génétique avec les stratégies mélange et mosaïque. En revanche, le régime de reproduction n’affecte pas (ou peu) l’efficacité de la protection contre la maladie, et ce quelle que soit la stratégie de déploiement considérée.

Projet MÉDÉE

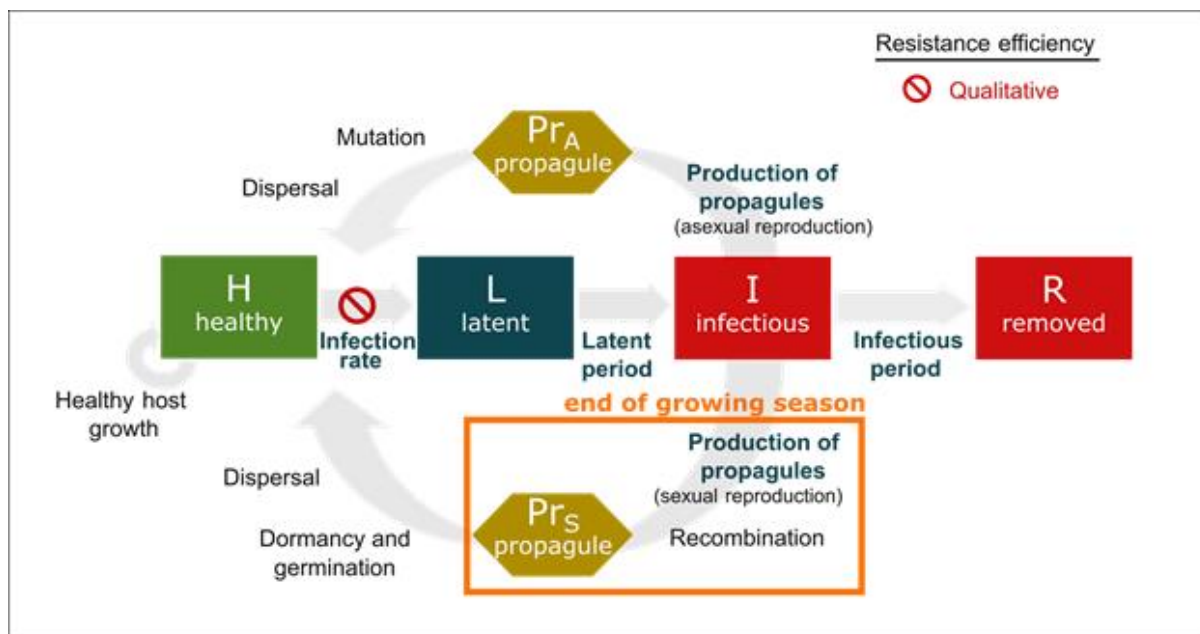


Figure 3 : Ajout du cycle de reproduction sexuée des agents pathogènes dans l'architecture du modèle *landsepi*. Pendant la saison de culture, les hôtes sains peuvent être infectés par des propagules générées par reproduction asexuée. Après une période de latence, les hôtes infectieux commencent à produire de nouvelles propagules asexuées, qui peuvent muter puis se disperser à leur tour dans le paysage. À la fin de la période infectieuse, les hôtes infectés deviennent épidémiologiquement inactifs. À l'issue de la saison de culture, de nouvelles propagules infectieuses sont produites cette fois par reproduction sexuée. Les spores ainsi formées restent en dormance dans le sol et germent au cours des saisons de culture suivantes, initiant de nouvelles épidémies.

Paramétrage pour le mildiou de la vigne. Nous avons ensuite défini un paramétrage mildiou de la vigne afin de pouvoir conduire des simulations aussi réalistes que possibles sur ce pathosystème. Deux sources d'informations ont été utilisées. La première, issue d'une sélection puis d'une analyse attentive de 18 références, a permis de renseigner les valeurs de 14 traits d'histoire de vie/paramètres du mildiou de la vigne. La seconde utilise le réseau de l'Observatoire national du déploiement des cépages résistants (OSCAR) pour définir des paramètres spécifiques de l'interaction entre les populations de mildiou du sud de la France et les deux facteurs de résistances Rpv1 et Rpv3.

Ajout d'un module de protection fongicide. Il s'agissait de modéliser l'effet des stratégies de protection fongicide sur les dynamiques épidémiques. Ce module considère des fongicides de contact réduisant le taux d'infection de l'agent pathogène. Partant d'une application à la dose recommandée couvrant uniformément les feuilles, ce module simule la décroissance de l'efficacité du fongicide sous l'effet de sa dégradation naturelle et de la croissance de la plante. Les traitements sont appliqués sur la base d'un calendrier prédéfini lorsque la sévérité de la maladie dépasse un seuil. Avec cet ajout, *landsepi* calcule désormais une variable de sortie environnementale permettant de comparer les scénarios testés selon un nombre de traitements appliqués pour garder au cours de la saison de culture la sévérité de la maladie en deçà d'un seuil prédéfini.

Ajout d'un module d'analyse économique spécifique de la vigne. Ce module permet de comparer les stratégies de déploiement sur des critères économiques en utilisant une analyse coût-bénéfice calculée à 3 échelles spatiales : (i) sur chaque parcelle du territoire chaque année, (ii) sur chaque exploitation (considérée comme un ensemble de parcelles) et (iii) sur l'ensemble du territoire de la cave coopérative (considéré comme l'ensemble des exploitations). Une attention particulière a été portée à la prise en compte des spécificités de la filière viticole tout en préservant la généricité de l'approche. Les variables suivantes sont prises en compte : (i) le produit qui dépend du rendement et du niveau de valorisation du vin (prix, lui-même fonction de l'état sanitaire de la parcelle, celle-ci pouvant être déclassée si le niveau de maladie est trop élevé), (ii) le coût de la plantation (fonction du coût des variétés déployées, les plants de variétés résistantes étant 2,5 fois plus onéreuses pour le moment), (iii) le coût de la protection phytosanitaire (facteurs de production engagés (intrants, main d'œuvre, équipement et matériel) et nombre de passages) et (iv) le bénéfice net annuel qui résulte de la différence entre (i) et (ii)+(iii). Un bénéfice net cumulé actualisé est calculé et correspond à la somme des bénéfices nets

Projet MÉDÉE

annuels actualisés sur 30 ans aux 3 échelles (parcelle, exploitation, coopérative). Les coûts sont des coûts standards, établis à partir de coûts de référence (Ugaglia, 2009). La fonction a été paramétrée pour la vigne à partir de la bibliographie pour le coût des facteurs de production et à dire d'expert pour le coût des variétés résistantes. Le développement de ce module repose sur une fonction reliant la sévérité de la maladie sur feuilles et les pertes de rendement (tant du point de vue quantitatif que qualitatif) (Savary *et al.*, 2009).

3.2 La coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques est risquée pour la durabilité

Comme évoqué en introduction, la question des risques associées à la coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et de variétés avec des résistances polygéniques se pose pour les gènes Rpv1 et Rpv3 de résistance de la vigne au mildiou. Ces facteurs de résistances peuvent être déployés i) dans la même variété (stratégie pyramidage "PY"), ii) dans des variétés monogéniques cultivées dans la même parcelle (stratégie mélange "MI"), iii) dans des variétés monogéniques cultivées dans des parcelles différentes (stratégie mosaïque "MO"), ou iv-v) dans des stratégies hybrides qui combinent le pyramidage avec les mélanges ou les mosaïques (stratégies "PY+MI" et "PY+MO").

Nous avons utilisé le modèle *landsepi* décrit dans Zaffaroni *et al.* (2024a) pour comparer les contrôles évolutif et épidémiologique procurés par les trois stratégies PY, PY+MI et PY+MO. Nous nous sommes appuyés sur des déploiements dans un paysage simplifié, composé de 400 parcelles carrées de 1 ha chacune. A faible probabilité de mutation vers la virulence, nos résultats montrent que les contrôles évolutif et épidémiologique fournis par la stratégie pyramidage sont compromis dès lors que des variétés monogéniques sont simultanément plantées dans le paysage (stratégies hybrides PY+MI et PY+MO), y compris en faible proportion (Figure 4A). De plus, l'efficacité de la stratégie pyramidage par rapport aux stratégies hybrides varie selon que les souches adaptées paient un coût d'adaptation sur l'ensemble des variétés considérées (sensibles comme résistantes) ou seulement pour leurs virulences superflues, et ce particulièrement lorsque ces coûts sont élevés (Figure 4A, situation $\theta=0.5$ et $a=0$ versus $\theta=0.5$ et $a=0.5$). Dans la première situation (fort coût de fitness payé uniquement pour les virulences superflues), la stratégie pyramidage surclasse les stratégies hybrides, alors que les performances sont comparables dans la seconde situation (fort coût de fitness payé sur toutes les variétés). Nos résultats montrent également que le différentiel de performance entre les trois stratégies s'estompe fortement à forte probabilité de mutation vers la virulence (Figure 4B). Les performances de la stratégie pyramidage font toutefois toujours jeu égal, voire sont substantiellement meilleures, que celles des stratégies hybrides dans l'ensemble des états de la nature, c'est-à-dire des combinaisons de paramètres testés dans nos simulations. L'intégralité de ces résultats est à retrouver dans Zaffaroni *et al.* (2024b).

La stratégie pyramidage tire en grande partie son avantage de la nécessité pour l'agent pathogène de cumuler les deux mutations lui permettant de contourner les deux facteurs de résistances considérés. Deux situations peuvent se présenter : soit ces deux mutations sont acquises simultanément, soit elles le sont séquentiellement, l'une après l'autre. Dans le premier cas, et sous hypothèse d'indépendance entre mutations, la probabilité d'acquérir à la fois la première et la seconde mutation de virulence est égale au carré de la probabilité de mutation phénotypique vers la virulence. L'intervention de ce carré rend l'événement "une souche super-pathogène apparaît dans la population de mildiou au cours d'une saison de culture" quasi-certain pour une forte probabilité de mutation phénotypique (de l'ordre de 10^{-4}) mais très fortement improbable à faible probabilité (de l'ordre de 10^{-8}). Ces différences se traduisent par un fort avantage au pyramidage sur les stratégies hybrides (Figure 4A) ou, a contrario, par des performances proches mais toujours favorables au choix du pyramidage seul (Fig. 4B). Cette dichotomie souligne l'importance de caractériser par des études dédiées les probabilités de mutation phénotypique vers la virulence qui demeurent largement méconnues à ce jour. Une étude récente suggère toutefois que ces événements sont plutôt fréquents pour le facteur Rpv3 (Paineau *et al.*, 2024). Ce résultat ne doit pas être transposé à d'autres résistances, le facteur Rpv3 ayant par exemple déjà été déployé dans certains hybrides producteurs directs cultivés en Europe avant la seconde guerre mondiale. Des études au cas par cas sont nécessaires, notamment pour Rpv1 dans notre cas d'étude.

Pour de faibles probabilités de mutation, l'acquisition simultanée des mutations de virulence est fortement improbable. Le scénario d'acquisition séquentielle qui s'impose alors favorise grandement la stratégie pyramidage sur les stratégies hybrides (Figure 4A). En effet, l'acquisition séquentielle

Projet MÉDÉE

nécessite l'établissement de souches avec des virulences simples (c'est-à-dire possédant uniquement l'une ou l'autre des mutations) dans les populations d'agents pathogènes. Ces établissements sont largement favorisés par le déploiement de variétés avec des résistances monogéniques car ces variétés constituent un tremplin évolutif favorisant l'émergence des souches "super-pathogène". Il existe cependant une exception à cette règle lorsque les coûts d'adaptation sont payés par les agents pathogènes sur toutes les variétés, et non uniquement pour leurs virulences inutiles. L'adaptation des agents pathogènes est alors ralentie par la durée nécessaire à l'établissement des mutants simples qui paient des coûts de fitness sur tous les hôtes présents du paysage. Dans cette situation, les stratégies hybrides, en particulier celles combinant pyramide et mélange PY+MI, offrent un contrôle évolutif et épidémiologique similaire à celui fourni par la stratégie pyramidage. Ce résultat renforce également le besoin d'expérimentations permettant d'estimer les coûts d'adaptation des souches de mildiou sur l'ensemble des variétés, sensibles comme résistantes, disponibles pour les viticulteurs.

3.3 Exploration des stratégies de déploiement dans le territoire des vignerons de Buzet au travers d'ateliers participatifs

Détaillons maintenant les six scénarios de déploiement définis au cours des ateliers (Tableau 1). À l'issue des deux premiers ateliers, le choix s'est porté uniquement sur le déploiement de variétés résistantes (VR) pyramidant Rpv1 et Rpv3. Initialement, toutes les parcelles des deux zones considérées dans le vignoble ("Coeur du vignoble" et "Vignoble à faible densité", Figure 2) sont cultivées avec des variétés sensibles (VS) d'âges connus. Les scénarios consistent à replanter au cours des 30 années de simulation considérées les parcelles avec une VS ou une VR selon plusieurs critères : renouvellement des parcelles âgées de plus de 30 ans, respect de la réglementation VIFA, implantation à proximité de zones sensibles, etc. Dans le scénario S1, toutes les parcelles sont plantées avec une VR dès que leur âge dépasse 30 ans, alors que dans le scénario S2 ces replantations concernent chaque année les 3.3% des parcelles les plus âgées. Les scénarios S3 et S4 intègrent des contraintes sur le pourcentage maximum de surfaces plantées par exploitation avec des VR, 5% dans le scénario S3 (en accord avec la réglementation VIFA), et 20% dans le scénario S4 (hypothèse d'un assouplissement réglementaire). Enfin, la localisation des parcelles plantées en VR a été testée dans les scénarios S5 et S6 en ciblant les Zones Non Traitée (ZNT) aquatique (c'est-à-dire à proximité de cours d'eau ou éléments du réseau hydrographiques) ou riverain (c'est-à-dire à proximité d'habitations). Ces zones sont soumises à une interdiction de traitements phytosanitaires avec des produits de synthèse à l'exception des produits de biocontrôle ou de ceux autorisés en agriculture biologique.

Au final, les six scénarios se différencient notamment par le pourcentage de surface cultivée en VR à l'issue des 30 années simulées (Tableau 1). Pour quatre d'entre eux, moins de 19 % des surfaces sont replantées avec des VR (S3, S4, S5, S6) alors que plus de 95% le seront dans les deux autres (S1 et S2). De plus, seul le scénario S2 correspond à une introduction progressive des VR ; dans les cinq autres la structure d'âge du parcellaire se traduit par une introduction rapide des VR dès les premières années de simulation. Un scénario statu quo S0 dans lequel seules des VS sont plantées a également été simulé pour servir de point de comparaison.

Projet MÉDÉE

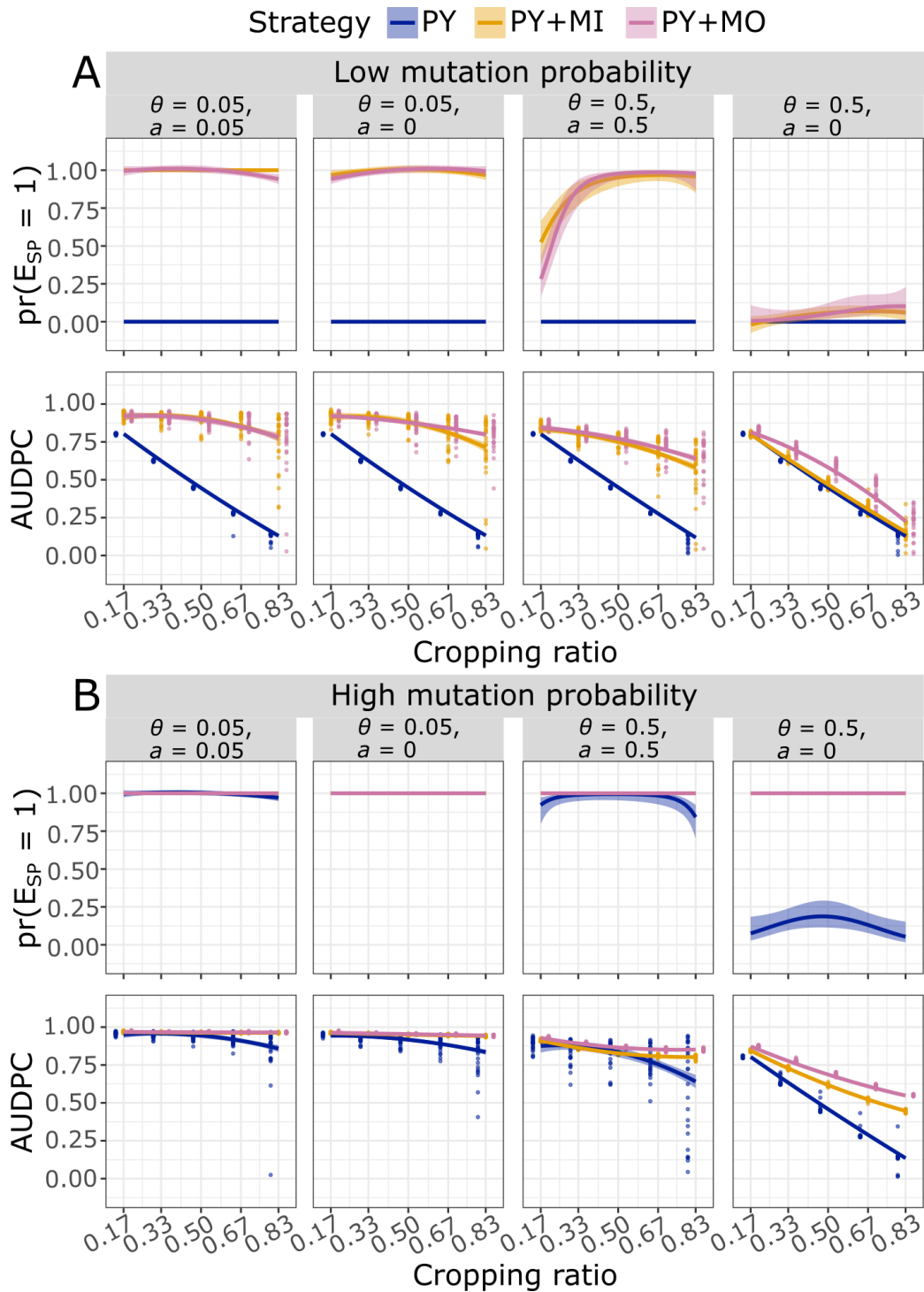


Figure 4 : Effets des taux de mutation, coûts d'adaptation et proportion de variétés résistantes sur la performance des stratégies pyramidage (PY) et hybrides (pyramidage et mélange PY+MI et pyramidage et mosaïque PY+MO). Le panneau du haut (A) est relatif à des valeurs faibles de probabilités de mutation, celui du bas (B) à des valeurs fortes. La première ligne de chaque panneau $\text{pr}(E_{\text{sp}}=1)$ montre la probabilité d'établissement des souches adaptées à la variété pyramidée ("super-pathogènes") et la deuxième ligne AUDPC montre l'intensité relative de l'épidémie (mesurée par l'aire sous la courbe de la proportion d'hôtes infectées). Les graphes pour chaque ligne correspondent à l'effet de proportion de variétés résistantes cultivée dans le paysage ("cropping ratio") sur la variable considérée en fonction d'un coût d'adaptation intermédiaire ($\theta = 0.05$) ou élevé ($\theta = 0.5$), payé uniquement pour les virulences superflues (respectivement, $a = 0.05$ et $a = 0.5$), ou sur tous les variétés ($a = 0$), pour les trois stratégies considérées. Les courbes sont basées sur l'ajustement de régressions logistiques de second ordre (première ligne) ou polynomiales (deuxième ligne) aux résultats des simulations ; les enveloppes délimitent les 5^e et 95^e percentiles.

Projet MÉDÉE

Chaque scénario a été discuté et commenté vis-à-vis des sorties du modèle (durabilité de la résistance, contrôle de la maladie, nombre de traitements et bénéfices nets) durant les ateliers 3 et 4, tout en le remettant dans le contexte dans lequel évolue la cave coopérative. La figure 5 illustre les évaluations des impacts environnementaux (nombre de traitements/parcelle/année) et économiques (bénéfices nets) sous trois hypothèses de valeurs de coûts de fitness dans les deux paysages de la cave coopérative sélectionnés pour l'étude. Les différences entre ces deux zones étant mineures, nous ne les commenterons pas dans la suite.

Le nombre de traitements fongicides appliqués par saison de culture et par parcelle est, à l'image du contrôle épidémiologique (non illustré), fortement influencé par la proportion de VR déployée (Figure 5A). Les scénarios S1 et S2, dans lesquels la quasi-totalité des parcelles sont replantées avec des VR au bout de 30 ans, fournissent les meilleurs résultats (réduction du nombre de traitement moyen de 83% avec S1 et de 51% avec S2). La meilleure performance du scénario S1 résulte de l'introduction initiale massive de VR (plus de 65% des parcelles replantées avec des VR dès la première année) contre seulement 50% des parcelles après 15 ans avec le scénario S2). À l'inverse, les plus faibles surfaces replantées en VR avec les scénarios S4 à S6 conduisent à des économies de traitement moindre, allant de 39% pour S4 à 5% pour S6. Derrière ces tendances moyennes, les résultats diffèrent également par la variabilité inter-simulations, mise en évidence par l'étendue des intervalles de confiance à 80 % (Figure 5A). Cette variabilité, bien plus importante dans les scénarios S1 et S2, s'explique par les contournements de résistances qui, lorsqu'ils surviennent, annulent le bénéfice des VR sur de larges portions du paysage. En résultent des distributions du contrôle épidémiologique et des nombres de traitements appliqués très fortement bimodales. Par ailleurs, à la différence des valeurs moyennes des économies de traitements qui ne dépendent pas des coûts de virulence payés par les agents pathogènes, de fort coûts de virulence (0.25) réduisent les intervalles de confiance. En pratique, l'existence de coûts sécurise donc les économies de traitements permises par les scénarios S1 et S2.

En arrière-plan de ce tableau interviennent les effets des scénarios sur le contrôle évolutif, c'est-à-dire sur la durabilité des VR déployées. Ainsi le scénario S1 procure le meilleur contrôle évolutif (tel qu'estimé par la probabilité d'établissement du super-pathogène) car il est associé à un déploiement massif des VR dès les premières années (probabilité d'établissement entre 0.14 et 0.25, selon le coût de fitness). Ce contrôle est bien meilleur que celui obtenu avec le déploiement progressif de S2 (probabilité d'établissement entre 0.12 et 0.4) où la coexistence entre VS et VR pendant de nombreuses années favorise l'émergence du super-pathogène depuis les VS. La durabilité résulte en fait d'un équilibre entre plusieurs mécanismes : (i) la probabilité d'apparition de souches super-pathogènes (augmente avec la part du paysage cultivé avec des VS), (ii) la capacité des souches super-pathogènes à se maintenir sur des VS en compétition avec des souches sauvages (diminue avec les coûts de virulence), et (iii) la probabilité de dispersion d'une souche super-pathogène d'une VS vers une VR (maximale dans des paysages avec moitié de VS et de VR). Nos résultats montrent également que la durabilité, et en cascade les autres variables de sorties considérées, sont modulées par les caractéristiques particulières des paysages considérées. Ainsi, des proportions proches de VR (scénarios S3, S5 et S6) conduisent à des différences de durabilité liées à la configuration spécifique des paysages de Buzet. Par exemple, fortuitement, les VR sont allouées à un plus grand nombre de petites parcelles dans le scénario S3 alors qu'elles le sont à un plus petit nombre de grandes parcelles dans les scénarios S5 et S6. Ces différences de configuration modifient le périmètre des longueurs de contact entre parcelles plantées avec des VS et celles plantées avec des VR, et donc les probabilités d'échanges de propagules infectieuses (i.e. spore) entre variétés.

Enfin, du point de vue économique, le déploiement de VR conduit à une augmentation des bénéfices nets par rapport au scénario S0 avec de larges différences entre scénarios (Figure 5B). Ces différences reflètent en grande partie les économies de traitements réalisées (Figure 5A) en lien, comme discuté précédemment, avec la part des surfaces dédiées aux VR. Ainsi, le scénario S1 apporte la plus forte augmentation de bénéfice net (36% par rapport au scénario de base S0). Les scénarios S2 et S4 apportent respectivement des augmentations de 10% et 9%. Les augmentations offertes par les 3 autres scénarios sont inférieures à 5%. Un second fait notable concerne les intervalles de confiance des bénéfices nets. À l'image de nos observations sur les traitements fongicides, les intervalles de confiance sont larges avec les scénarios S1 et S2, soit les scénarios les plus prometteurs en moyenne sur l'ensemble des critères considérés. Il s'agit encore une fois des conséquences des contournements de résistance. Deux processus impactent alors les résultats économiques. D'une part, les contournements annulent l'avantage des VR comme source d'économie sur le coût de la protection phytosanitaire. D'autre part, le surcoût à l'achat de ces variétés peut ne pas être compensé par les économies de

Projet MÉDÉE

traitement réalisées si les contournements arrivent rapidement après la plantation. Cette situation se produit notamment avec le scénario S2 de plantation progressive. Ce scénario est le seul pour lequel l'intervalle de confiance à 80% inclut des valeurs négatives des variations de bénéfices nets, soit des situations impliquant des pertes économiques par rapport au statu quo.

Tableau 1 : Résumé des scénarios co-construits avec les équipes de la cave coopérative "Nous, les vignerons de Buzet". Les scénarios sont définis sur la base de règles, qui guident le choix des parcelles replantées avec des variétés résistantes (VR) ou des cultivars sensibles (VS). Le pourcentage de la surface du territoire planté avec des VR et des VS au bout de 30 ans est indiqué. Les scénarios concernent les paysages "Coeur du vignoble" (CdV) et "Vignoble à faible densité" (VA).

Scénario	Règle de plantation	% de plantation après 30 ans			
		CdV		VA	
		VS	VR	VS	VR
S0	statu quo: VS plantés dans les parcelles âgées de + de 30 ans	100	0	100	0
S1	VR plantés dans les parcelles âgées de + de 30 ans	0	100	0	100
S2	VR plantés dans 3.3% des parcelles les plus âgées tous les ans	0	98	0	96
S3	VR plantés dans des parcelles âgées de + de 30 ans jusqu'à 5 % de surface/exploitation, VS sinon	95	5	96	4
S4	VR plantés dans des parcelles âgées de + de 30 ans jusqu'à 20 % de surface/exploitation, VS sinon	81	19	81	19
S5	VR plantés uniquement dans des parcelles classées ZNT Aquatique, et VS plantés dans des parcelles âgées de + de 30 ans	91	9	95	5
S6	VR plantés uniquement dans des parcelles classées ZNT Riverains, et VS plantés dans des parcelles âgées de + de 30 ans	94	6	96	4

4. Discussions et conclusions

L'approche par modélisation mobilisée dans ces travaux s'appuie sur de solides bases mathématiques et sur les connaissances acquises en épidémiologie et sur l'évolution des agents phytopathogènes depuis les quatre dernières décennies (Rimbaud *et al.*, 2021ab). En s'affranchissant des contraintes logistiques, financières et légales associées à l'expérimentation dans les systèmes agricoles, la modélisation permet de comparer un ensemble de stratégies de déploiement de variétés résistantes sans prendre le risque d'épidémies désastreuses ou de contournements de résistance. Par ailleurs, en simplifiant une réalité complexe, un modèle est souvent généralisable à plusieurs situations comparables. Ainsi, les conclusions obtenues sur le territoire de Buzet sont très vraisemblablement transposables sur d'autres territoires viticoles, voire à la gestion d'agents pathogènes présentant des cycles épidémiques proches de celui du mildiou de la vigne. C'est par exemple le cas du phoma du colza, causé par le champignon *Leptosphaeria maculans*, dont le cycle est caractérisé par des phases de reproduction clonale durant la saison de culture du colza, entrecoupées par des événements de reproduction sexuée lors des intercultures. A l'instar du mildiou de la vigne, le phoma du colza est au cœur des enjeux sur la réduction des traitements phytosanitaires et la préservation des gènes de résistance. Nos résultats ont donc probablement un intérêt pour cette filière, parmi d'autres.

Projet MÉDÉE

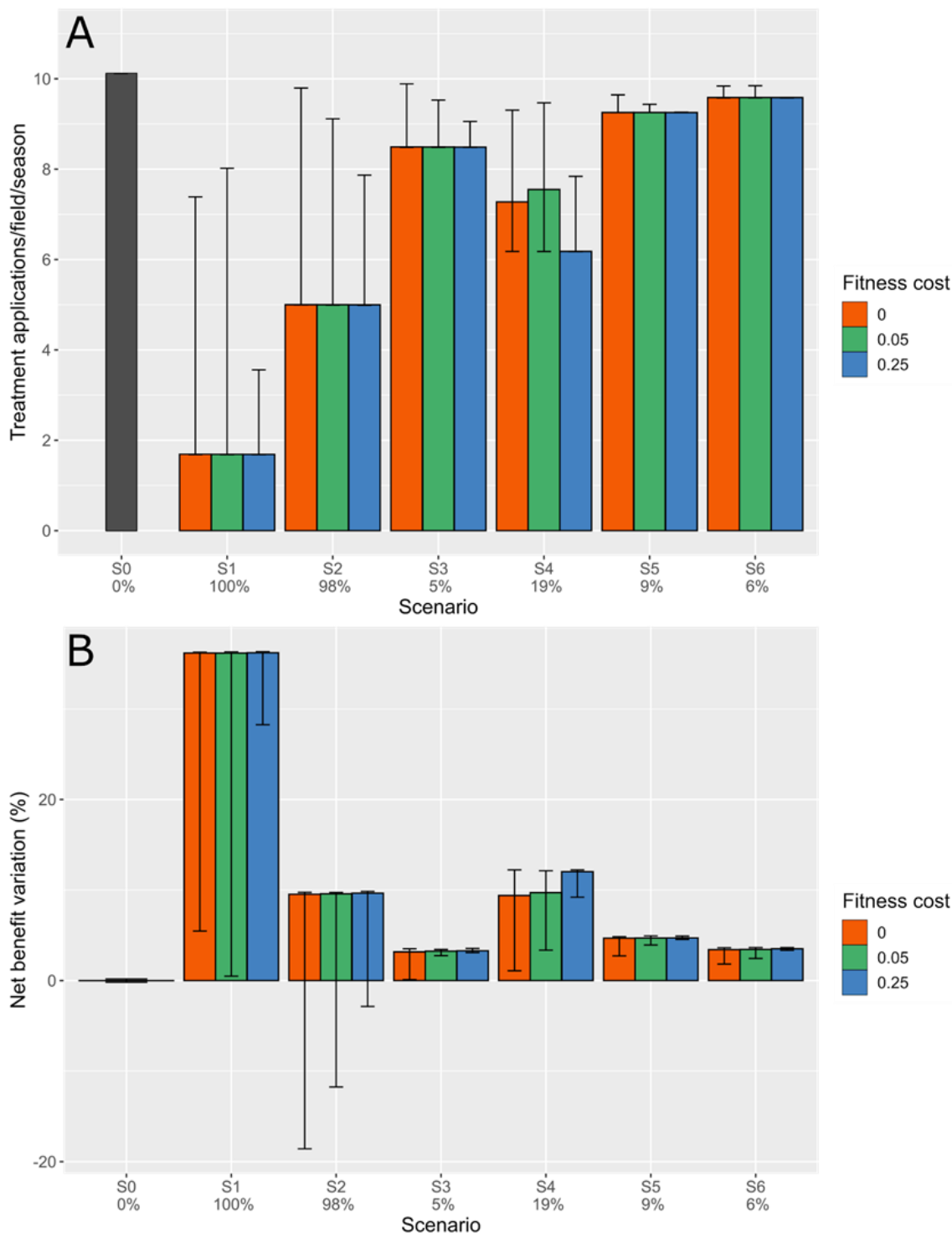


Figure 5 : Impacts environnementaux et économiques des six scénarios de déploiement retenus à l'issue des ateliers. A: Nombre de traitements par parcelle et par saison de culture pour les 6 scénarios. Les simulations ont été réalisées dans le paysage "Cœur du vignoble" du territoire de la coopérative, sous trois hypothèses de coûts d'adaptation des souches de mildiou aux facteurs de résistance ("fitness cost"). Les histogrammes correspondent à la médiane des nombres de traitements calculée sur 50 réplicats, et les intervalles montrent les quantiles 10 % et 90 %. B: Identique au panel A pour la variation du bénéfice net (BN) calculée par rapport au scénario de référence S0 (replantation uniquement avec des variétés sensibles).

Pour autant, les résultats d'une expérience (qu'elle soit numérique comme ici ou réalisée dans le monde réel) doivent être interprétés à la lumière des hypothèses sous-jacentes et des simplifications présumées. Ainsi, le modèle *landsepi* ne considère pas les effets des variables environnementales

Projet MÉDÉE

(notamment météorologiques) bien qu'elles façonnent sur le court terme les dynamiques épidémiques. Telle n'est pas la question traitée ici. Nous nous focalisons uniquement sur les interactions entre les aspects épidémiologiques, évolutifs et économiques sur le long terme avec l'objectif de comparer les stratégies de déploiement "toutes choses étant égales par ailleurs". Nous supposons donc que l'effet des conditions météorologiques, en affectant de la même façon toutes les stratégies, ne changerait pas nos conclusions. Par contre ces mêmes conclusions ne sont donc valides que dans le périmètre de cette hypothèse. Plus généralement, si la modélisation joue le rôle d'outil intégrateur des mécanismes de l'épidémiologie et de l'évolution qui se déroulent à des échelles spatiales et temporelles emboîtées (plantes, parcelles, paysage-territoire), elle ne peut pas tout. L'expérimentation et l'observation ont une place tout aussi importante pour informer, calibrer et tester les modèles. Ainsi, nos résultats sur la coexistence de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques montrent clairement le besoin d'études expérimentales pour préciser les valeurs de certains paramètres (probabilité de mutation phénotypique, coût de fitness) qui influencent très fortement l'issue probable de telles associations variétales.

L'objectif premier de ce travail était que les équipes d'une cave coopérative, acteurs du changement à l'échelle d'un territoire viticole, se saisissent de la question des variétés résistantes aux maladies, de leur déploiement et de leur durabilité. Si, au départ du projet, la cave coopérative avait déjà un intérêt pour les innovations variétales, les ateliers participatifs furent des lieux d'échange mutuellement bénéfiques entre professionnels de terrain, pour s'approprier les facteurs influençant la durabilité des résistances variétales, et chercheurs, pour préciser - voire modifier - leurs hypothèses de travail. Les discussions de ces quatre matinées de travail, aux côtés d'éléments de biologie, sont retranscrites dans une bande dessinée de vulgarisation scientifique (Plantin *et al.*, 2024 ; Figure 6). La possibilité de réaliser en direct (via une interface web) des simulations de déploiement de variétés résistantes dans *le parcellaire réel de Buzet a joué un rôle majeur de facilitation du dialogue. De même, le recours à des agences spécialisées dans l'animation d'ateliers participatifs, comme nous l'avons fait avec l'agence Think+, a permis à chaque participant de se centrer sur les fondamentaux de son métier. Au cours des ateliers, les équipes de la cave coopérative "Nous, les vignerons de Buzet" sont passés par plusieurs phases (notamment une phase d'idéation où leur créativité en termes de scénarios a été grande), pour aboutir à des scénarios de déploiement plus réalistes, bien que parfois en rupture avec le schéma de l'AOP. C'est aussi un des intérêts de la modélisation que de s'autoriser à dépasser les limites des systèmes de culture existants pour imaginer des scénarios en rupture.*

Les ateliers ont débouché sur l'identification de deux scénarios de déploiement des variétés résistantes plus probables à court terme pour la cave coopérative, les scénarios S5 et S6 avec plantation des VR en ZNT. Leur mise en œuvre nécessiterait cependant que l'INAO valide la demande portée par la cave coopérative d'inscription des cépages résistants rouges Artaban et Vidoc dans le cahier des charges de l'AOP Buzet pour qu'elle puisse accompagner les viticulteurs dans leurs plantations. Au final, la cave coopérative aura ajusté ses choix de scénarios et le raisonnement sur sa stratégie d'innovation au fil des échanges et au regard des résultats fournis par le modèle. Elle aura montré sa capacité, en tant qu'entreprise qui porte un projet collectif au service de ses membres, à prioriser des scénarios privilégiant la protection de la durabilité des gènes de résistance et le contrôle des épidémies, et donc les besoins socio-économiques de ses membres à long terme. L'action collective de déploiement des VR menée à l'échelle de la coopérative - au départ organisation productive résultant sur la mise en commun de moyens et de ressources, mais aussi groupe de personnes formant une communauté de projet - pourrait donc être à l'origine d'une gouvernance effective des gènes de résistance.

La priorisation de ces deux scénarios par les acteurs intègre un ensemble de considérations bien plus large que la question spécifique de la durabilité des résistances traitée par modélisation. Les discussions se sont en particulier focalisées sur les freins et leviers à l'adoption de ces scénarios par les viticulteurs et les consommateurs. Au niveau des viticulteurs, les leviers mobilisables sont (i) la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires (avérée dans l'ensemble de nos simulations) et des résidus de pesticides dans les vins, (ii) l'amélioration des conditions de travail et (iii) l'enthousiasme de certains viticulteurs pour l'innovation. Au contraire, les freins et doutes raisonnables concernent (i) l'adaptation des variétés résistantes au changement climatique, (ii) la crainte de revenir aux stratégies de traitement habituelles en cas de contournement, (iii) la disponibilité des plants résistants, (iv) la réémergence de maladies classiquement maîtrisées par les traitements phytosanitaires (black-rot) et (v) les contraintes réglementaires liées aux VIFA qui limitent les possibilités de plantation, et donc les économies de traitement. Ce dernier point est toutefois modulé par la capacité des AOP à adapter leurs règles sur le temps long.

Projet MÉDÉE

La demande joue également un rôle important pour l'acceptabilité des variétés résistantes. L'intérêt, voire le consentement à payer des consommateurs pour des vins nouveaux proposant de meilleures performances environnementales et sanitaires sera déterminant dans le choix des viticulteurs (Fuentes Espinoza *et al.*, 2018). La cave coopérative communique d'ores et déjà sur des produits innovants, notamment auprès des consommateurs locaux, en mobilisant la corde du locavorisme dans son magasin. Toutefois, plusieurs freins questionnent le potentiel de différenciation des vins produits à partir de ces cépages et l'information à délivrer sur les VR aux consommateurs : (i) un risque d'amalgame entre variétés résistantes (obtenues par un processus de sélection traditionnel basé sur des croisements) et organismes génétiquement modifiés, (ii) un risque de perte des consommateurs traditionnels, (iii) la difficulté de bénéficier de l'avantage du premier arrivé (first mover advantage), c'est-à-dire de l'avantage économique qu'obtiennent les acteurs qui adoptent une technologies avant les autres, si de nombreuses entreprises s'engagent dans cette démarche et (iv) une difficulté à valoriser ces nouveaux vins face à la multiplication des labels.

Le projet a ainsi permis de donner de la visibilité aux gènes de résistance en tant que biens communs matériels et d'en montrer la valeur en utilisant une démarche participative pour le déploiement des variétés résistantes. Mais ce n'est là qu'une première étape qui montre la nécessité de mettre en œuvre des approches participatives (living-lab) et pluridisciplinaires pour promouvoir une gestion partagée de la santé des plantes en donnant toute leur place aux sciences humaines et sociales.

5. Références bibliographiques :

Agreste, 2021. Enquête Pratiques Phytosanitaires en viticulture en 2019 : IFT et nombre de traitements. www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2019. Pratiques culturales en grandes cultures 2017 : IFT et nombre de traitements. www.agreste.agriculture.gouv.fr

Delmotte F., Fabre F., Miclot A.S., Paineau M., Schneider C., Delière L. (2021). Des vignes, des invasions et des résistances. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quae, <https://hal.inrae.fr/hal-03130984>

Fabre F., Carpentier F., Papaix J., Boixel A.-L., Berthier K. (2021). Diversifier les paysages cultivés : état des connaissances et perspectives de recherche. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quae, <https://hal.inrae.fr/hal-03130984>

Fouillet, E., Delière, L., Chartier, N., Munier-Jolain, N., Cortel, S., Rapidel, B., & Merot, A. (2022). Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. *European Journal of Agronomy*, 136, 126503.

Fuentes Espinoza, A., Hubert, A., Raineau, Y., Franc, C., Giraud-Héraud, E. (2018). Resistant grape varieties and market acceptance: an evaluation based on experimental economics. *OENO One*, 52(3). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.3.2316>

Gilligan, C.A., 2008. Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363, 741–759. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2181>

Hannachi M, Coléno F., Bousset L., Delourme R., ChevreA-M., Balesdent MH., Rouxel T., Pinochet X., Leflon M., Multeau C., Garmendia-Auckenthaler L. (2021). Vers une gestion des gènes de résistance comme des biens communs. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quae



Figure 6 : Couverture de la bande dessinée de vulgarisation scientifique “Les résistantes : Des vignes pas comme les autres” (Plantin et al., 2024).

Projet MÉDÉE

Ostrom, E. 1990. Governing the commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Pp. 280

Paineau M., Mazet I. D., Wiedemann-Merdinoglu S., Delmotte F., Fabre F. (2022). The characterization of pathotypes in grapevine downy mildew provides insights into the breakdown of Rpv3, Rpv10 and Rpv12 factors in grapevines. *Phytopathology*, 112 (11), 2329-2340, <https://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-11-21-0458-R>

Paineau, M., Minio, A., Mestre, P., Fabre, F., Mazet, I.D., Couture, C., Legeai, F., Dumartinet, T., Cantu, D. and Delmotte, F. (2024), Multiple deletions of candidate effector genes lead to the breakdown of partial grapevine resistance to downy mildew. *New Phytol.* <https://doi.org/10.1111/nph.19861>

Papaïx J., Berthier K., Fabre F., Moury B., Ravigné V., Rimbaud L. (2021). Écologie des interactions plante-bioagresseur. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quae, <https://hal.inrae.fr/hal-03131072>

Plantin L., Miclot A.S., Papaïx J., Rey J-F., Rimbaud, L., Zaffaroni M., Alonso Ugaglia A., Fabre F 2024. Les résistantes : Des vignes pas comme les autres. 2024. <https://hal.inrae.fr/hal-04604456>

REX Consortium. Heterogeneity of selection and the evolution of resistance. *Trends Ecol Evol.* 2013 Feb;28(2):110-8. doi: 10.1016/j.tree.2012.09.001

Rimbaud L., Fabre F., Papaïx J., Moury B., Lannou C., Barrett L., Thrall P. (2021a). Models of plant resistance deployment. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 125-152, <https://dx.doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-122134>

Rimbaud L., Papaïx J., Fabre F. (2021b). Stratégies paysagères pour déployer efficacement et durablement la résistance : modèles et prédictions. In : L'immunité des plantes. Pour des cultures résistantes aux maladies. Editions Quae. <https://hal.inrae.fr/hal-03131097>

Rimbaud, L., Papaïx, J., Barrett, L. G., Burdon, J. J., & Thrall, P. H. (2018b). Mosaics, mixtures, rotations or pyramiding: What is the optimal strategy to deploy major gene resistance? *Evolutionary Applications*, 11(10), 1791–1810.

Rimbaud, L., Papaïx, J., Rey, J.-F., Barrett, L. G., & Thrall, P. H. (2018a). Assessing the durability and efficiency of landscape-based strategies to deploy plant resistance to pathogens. *PLoS Computational Biology*, 14(4), e1006067.

Savary, S., Delbac, L., Rochas, A., Taisant, G., Willocquet, L., 2009. Analysis of Nonlinear Relationships in Dual Epidemics, and Its Application to the Management of Grapevine Downy and Powdery Mildews. *Phytopathology* 99, 930–942. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-8-0930>

Ugaglia A., 2009. Pratiques de comptabilité analytique en viticulture : des coûts de production au coût des pratiques environnementales, *La Revue du Financier*, n°176, mars-avril 2009.

Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey J-F., Papaïx J., Fabre F. 2024a. Effects of pathogen reproduction system on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major resistance genes in agricultural landscapes. *Evolutionary Applications*, 17 (1), pp.e13627. <https://dx.doi.org/10.1111/eva.13627>

Zaffaroni M., Papaïx J., Rimbaud L., Geffersa A., Rey JF., Fabre F., 2024b. Combining single-gene-resistant and pyramided cultivars in agricultural landscape compromises the benefits of pyramiding in most, but not all, productions situation. A paraître dans *Phytopathology*, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-24-0075-R>

Zhan, J., Thrall, P. H., Papaïx, J., Xie, L., & Burdon, J. J. (2015). Playing on a Pathogen's weakness: Using evolution to guide sustainable plant disease control strategies. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 19–43.

Projet MÉDÉE

Annexe : textes des publications

*Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier PDF de préférence)
Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs*

☐ Publications scientifiques parues

Merci de joindre des tirés à part et d'indiquer les restrictions en termes de droits de reproduction (notamment sur le site Internet du MTE). Notez que ce rapport pourra être mis en ligne sur le site Internet du MTE.

Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey JF., Papaïx J., Fabre F., 2024. Effects of pathogen reproduction system on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major resistance genes in agricultural landscapes. Evolutionary Applications, 17 (1), pp.e13627. <https://dx.doi.org/10.1111/eva.13627>

Zaffaroni M., Papaïx J., Rimbaud L., Geffersa A., Rey JF., Fabre F., 2024. Combining single-gene-resistant and pyramided cultivars in agricultural landscape compromises the benefits of pyramiding in most, but not all, productions situation. A paraitre dans Phytopathology, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-24-0075-R> ; <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.02.14.580232v1>

Les tirés à part de ces deux articles sont librement disponibles sur internet (publication en libre accès).

☐ Publications scientifiques à paraître

☐ Publications scientifiques prévues

Zaffaroni M., Fabre F., Miclot AS., Rimbaud L., Papaïx J., Rey JF., Alonso Ugaglia A., en cours de rédaction. Deployment of resistant grapevines decreases fungicide treatments and increases net benefit of a cooperative winery: insights from a participative science project.

Cette publication est en cours de rédaction à la date de remise de ce rapport.

Projet MÉDÉE

Annexe : partie confidentielle

Vous pouvez insérer ici toute information ou résultat qui revêt une part de confidentialité.

Merci de préciser le degré de confidentialité de ces données.

Nous vous recommandons de préciser dans la partie non-confidentielle, l'existence de ces données confidentielle et d'expliquer la raison de leur confidentialité.

Cette partie sera diffusée aux évaluateurs mais ne sera pas diffusée en dehors d'eux.

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier PDF de préférence). Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

Rien à signaler dans cette annexe