



Vers des mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le déploiement des cépages résistants

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

► To cite this version:

Frédéric Fabre, Anne-Sophie Miclot, Loup Rimbaud, Marta Zaffaroni, Julien Papaïx, et al.. Vers des mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le déploiement des cépages résistants. *Innovations Agronomiques*, 2024, 96, pp.58-73. 10.17180/ciag-2024-vol96-art05 . hal-04728109

HAL Id: hal-04728109

<https://hal.inrae.fr/hal-04728109v1>

Submitted on 9 Oct 2024

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

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



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



Vers des mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le déploiement des cépages résistants

Frédéric FABRE¹, Anne-Sophie MICLOT¹, Loup RIMBAUD², Marta ZAFFARONI^{1,3}, Julien PAPAIX³, Jean-François REY³, Adeline ALONSO UGAGLIA⁴

¹ INRAE, Bordeaux Sciences Agro, SAVE, 33882 Villenave d'Ornon, France

² INRAE, PV, 84140 Montfavet, France

³ INRAE, BioSP, 84914 Avignon, France

⁴ Bordeaux Sciences Agro, UMR SAVE, ISVV, 33175, Gradignan, France

Correspondance : frederic.fabre@inrae.fr

Résumé

Dans ce travail, nous avons adapté un modèle mathématique pré-existant (*landsepi*) pour simuler des scénarios de déploiement de variétés de vigne résistantes au mildiou dans des territoires viticoles. Le modèle a été utilisé pour explorer les effets de la coexistence potentielle entre des variétés portant des résistances monogéniques et polygéniques dans des paysages agricoles simplifiés. Puis, nous avons travaillé sur le territoire de la cave coopérative « Nous, les vignerons de Buzet » pour co-construire, évaluer et comparer un ensemble de scénarios de déploiement collectif des variétés de vigne résistantes au mildiou répondant à la vision stratégique des acteurs. Ces scénarios ont été évalués pour leurs effets sur le contrôle des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction des traitements fongicides et les performances économiques.

Mots-clés : variétés résistantes, durabilité des résistances, mildiou de la vigne, modélisation d'accompagnement, modélisation mathématique, territoire viticole, analyse coût-bénéfice, ateliers de co-construction, cave coopérative.

Abstract : Towards pesticide-saving agricultural mosaics: from modelling to territorial consultation for the deployment of resistant grape varieties

In this work, we adapted an existing mathematical model (*landsepi*) to simulate collective deployment scenarios of downy-mildew resistant grapevine varieties in wine-growing regions. We first used this model to explore the effects of the potential coexistence of varieties with monogenic and polygenic resistance in simplified agricultural landscapes, a possibility now available to winegrowers. Then, we worked in the region of the PDO Buzet (south-western France) to co-construct, evaluate, and compare a set of deployment scenarios for the adoption of resistant grapevine varieties in line with the strategic vision of the wine co-operative "Nous, les vignerons de Buzet". Finally, these scenarios were evaluated for their effects on epidemic control, resistance durability, reduction of fungicide treatments and economic performance.

Keywords: resistant varieties, resistance durability, downy mildew, companion modelling, grapevine mathematical modelling, wine-growing territory, cost-benefit analysis, co-construction workshops, wine co-operative.



1. Introduction

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 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 permettant des réductions d'IFT significatives (Oscar, 2023). Un des enjeux de leur déploiement 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 et ce d'autant plus rapidement que ces variétés sont largement cultivées.

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 qui 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, 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). Les viticulteurs disposent également de leviers pour une gestion durable des résistances, notamment au travers des choix variétaux qu'ils opèrent lors de la plantation des parcelles. 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 lorsqu'ils concernent 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). 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.). Le déploiement des variétés résistantes n'en est qu'à ses débuts et cette situation constitue une opportunité unique pour imaginer des stratégies de déploiement 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'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 à laquelle il pourrait être intéressant de raisonner le déploiement de ces variétés. Les gènes de résistances sont présentés dans la littérature comme des biens communs (Hannachi et al., 2021), dans le sens où il existe une forme de rivalité pour leur usage (une utilisation massive par des agriculteurs limite la durabilité de la résistance



dans le temps et donc la disponibilité des gènes pour d'autres utilisateurs) alors qu'elles sont librement disponibles à partir du moment où elles sont multipliées dans les pépinières et mises sur le marché. 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. De par leur rôle de conseil et d'accompagnement de leurs membres, voire de prescripteur au moment de la plantation, hypothèse peut être faite que les coopératives pourraient constituer des organisations en capacité de garantir une gestion collective et durable des variétés résistantes aux maladies.

Le projet Médée « Vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le DÉploiement des cépages Résistants » a eu pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des freins et des leviers au déploiement des variétés résistantes de vigne à l'échelle du paysage et d'un territoire (AAP Ecophyto – Leviers Territoriaux, 2019-2023). Tout d'abord, l'expérimentation au sens classique étant inopérante pour comparer des stratégies de déploiement à ces échelles, le projet s'est appuyé sur la modélisation 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). Le modèle a également été utilisé pour explorer de manière théorique les effets de la coexistence potentielle de variétés monogéniques et polygéniques dans des paysages agricoles simplifiés. 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. Nous avons travaillé sur le territoire et le parcellaire de la cave coopérative "Nous, les vignerons de Buzet" (AOP Buzet) 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. Méthodes mobilisées dans le projet Médée

2.1 Développement du modèle *landsepi* pour simuler des stratégies de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans les territoires viticoles

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*).

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 1). Les modifications apportées au modèle, ainsi qu'une 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 principales stratégies de déploiement de deux gènes majeurs de résistances (pyramidage, rotation, mélange et mosaïque) sont présentées dans Zaffaroni et al. (2024a).

Paramétrage pour le mildiou de la vigne. Dans Zaffaroni et al. (2024a), nous avons également 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 et les facteurs de résistances Rpv1 et Rpv3.

Ajout d'un module de protection fongicide. Il s'agissait ici 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 le nombre de traitements appliqués par parcelle et par saison.

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 réalisée 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). Les variables prises en compte sont (i) le produit qui dépend du rendement et du niveau de valorisation du vin (i.e. son 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 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).



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. 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. En 2020, la production était d'environ 13 millions de bouteilles. 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. La cave coopérative accompagne également les viticulteurs dans le renouvellement des parcelles.

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 de développement durable.

Le premier atelier a eu pour thème la “Compréhension des enjeux et partage des objectifs de l'entreprise ». 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 douze scénarios exploratoires de déploiement à simuler sur leur parcellaire. Ces scénarios répondaient 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. Cette étape a permis d'éliminer certains scénarios et d'en préciser d'autres pour aboutir au final à six scénarios préférentiels 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 La coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques est risquée pour la durabilité

Les deux gènes Rpv1 et Rpv3 de résistance de la vigne au mildiou 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 3A). 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 3A, situation $\theta=0.5$ et $a=0$ versus $\theta=0.5$ et $a=0.5$). Dans la seconde 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 première 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 3B). 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 considérés, c'est-à-dire des combinaisons de paramètres testés dans nos simulations (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 résistance 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 3A) ou, a contrario, par des performances proches mais toujours favorables au choix du pyramidage seul (Figure 3B). 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 3A). En effet, l'acquisition séquentielle 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.

3.2 Exploration des stratégies de déploiement dans le territoire des vigneron de Buzet au travers d'ateliers participatifs

Les six scénarios auxquels ont abouti les ateliers constituent le premier résultat de ce travail de recherche participatif (Tableau 1). 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 VIFA¹, 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 privilégiée par les acteurs dans les scénarios S5 et S6 en ciblant les Zones Non Traitées (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. 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.

Tout d'abord, 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 4A). 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 traitements moyen de 83 % avec S1 et de 51 % avec S2). Les différences entre les deux zones étant mineures, nous ne les

¹ La plantation des variétés de vigne résistantes aux maladies répond également à un cadre réglementaire, notamment dans les vins produits en AOP. 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). 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 prolongée de 5 ans (au choix des AOP).



commenterons pas dans la suite. 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 S3 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 4A). 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 forts coûts de virulence sécuriserait donc les économies de traitements permises par les scénarios S1 et S2.

En arrière-plan 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 4B). Ces différences reflètent en grande partie les économies de traitements réalisées en lien avec la part des surfaces dédiées aux VR (Figure 4A). 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 des observations sur les traitements fongicides, les intervalles de confiance sont larges dans 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 coût des traitements réalisées si les contournements arrivent rapidement après la plantation. Cette situation se produit notamment avec le scénario S2 (plantation progressive des VR). Ce scénario est le seul pour lequel l'intervalle de confiance à 80 % inclut des valeurs négatives pour les variations de bénéfices nets, soit des situations impliquant des pertes économiques par rapport au *statu quo*.



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. 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. Ces 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, en lien avec le thème « Leviers territoriaux » de l'appel à projet, était que les équipes d'une organisation collective, actrice du changement à l'échelle d'un territoire viticole, puisse se saisir 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 ateliers, aux côtés d'éléments de biologie, sont retranscrites dans une bande dessinée de vulgarisation scientifique (Plantin et al., 2024). 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 une agence spécialisée dans l'animation d'ateliers participatifs 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 plus en rupture. De ce point de vue-là, l'objectif est rempli.

Les ateliers ont débouché sur l'identification de deux scénarios de déploiement des variétés résistantes identifiés plus probables à court terme par la cave coopérative, qui correspondent aux 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 variétés résistantes 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 cave coopérative - au départ organisation productive reposant sur la mise en commun de moyens et de ressources, mais aussi organisation collective formant une communauté de projet - pourrait donc être à l'origine d'une gestion durable 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. 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 technologie 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.

Enfin, 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.

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 s'appuyant sur une démarche participative pour le déploiement des variétés résistantes aux échelles du paysage et du territoire. Mais ce n'est qu'une première étape qui montre la nécessité de mettre en œuvre des approches participatives (telles que les living-lab) et pluridisciplinaires pour promouvoir une gestion partagée de la santé des plantes en donnant toute leur place aux sciences humaines et sociales.

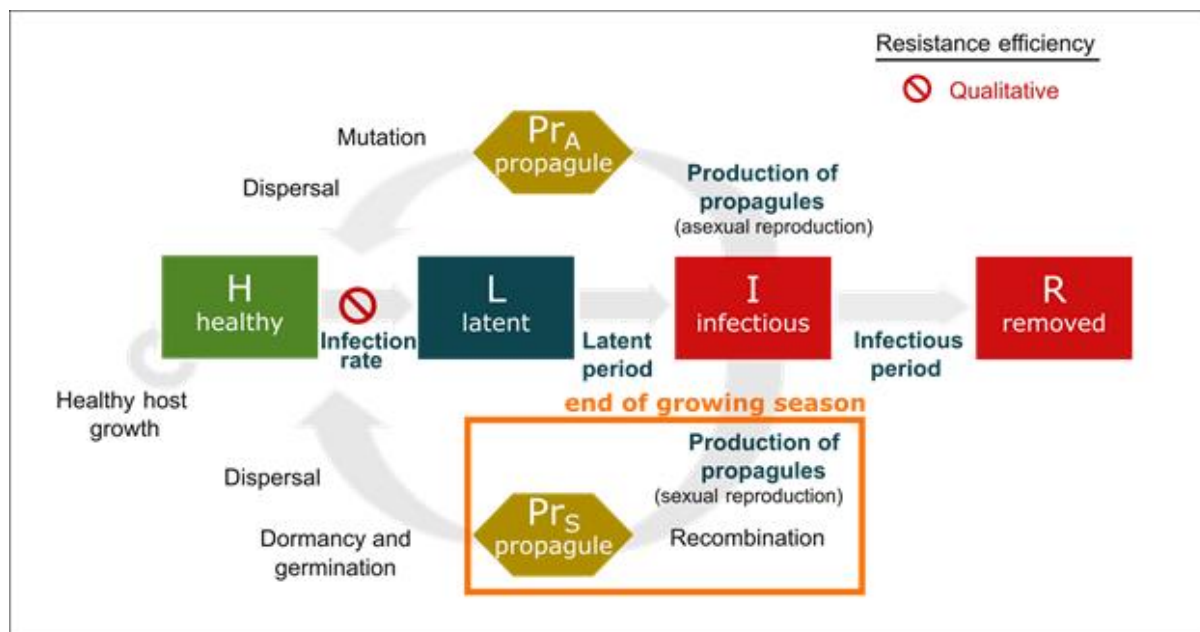


Figure 1 : Ajout du cycle de reproduction sexuée des agents pathogènes dans l'architecture du modèle *landsepi*. Pendant la saison de culture, les hôtes sains peuvent être infectés par des propagules générées par reproduction asexuée. Après une période de latence, les hôtes infectieux commencent à produire 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.

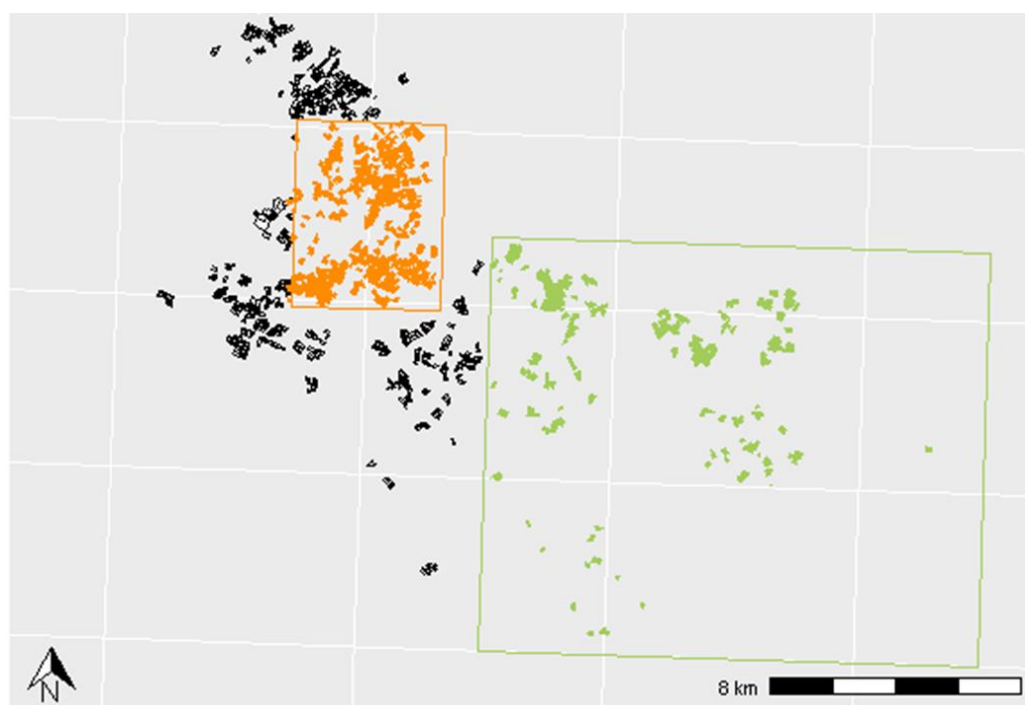


Figure 2 : Carte du parcellaire viticole de l'AOP Buzet. Deux paysages ont été considérés au sein de ce territoire comme support pour les simulations. Le paysage "Coeur du vignoble" correspond à la zone centrale du territoire (en orange). Il comprend 1422 parcelles (surface moyenne 0.46 ha) et 57 agriculteurs.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

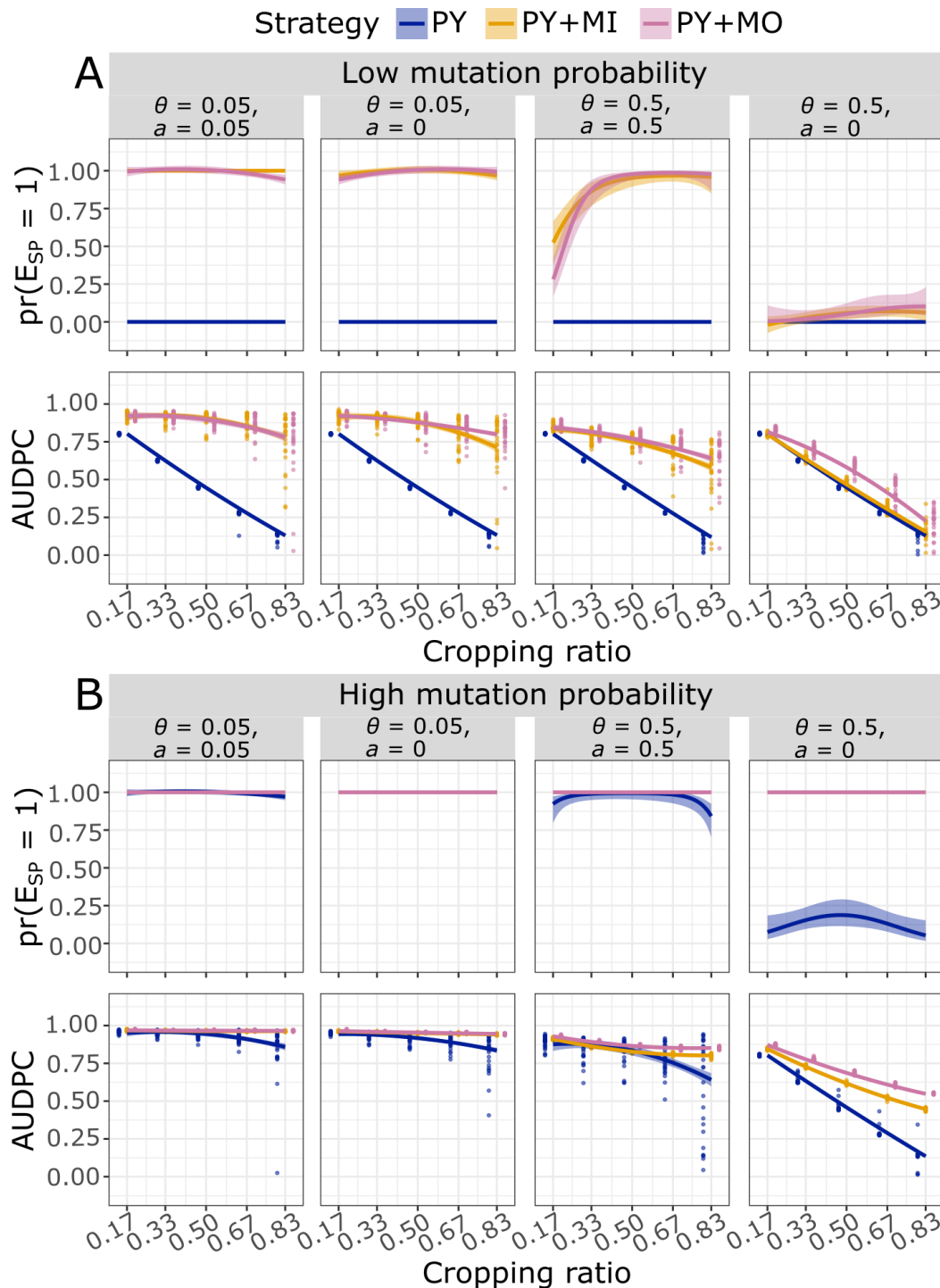


Figure 3 : Effets des taux de mutation, coûts d'adaptation et proportion de variétés résistantes sur la performance des stratégies pyramidage (PY) et hybrides (pyramidage et mélange PY+MI et pyramidage et mosaïque PY+MO). Le panneau du haut (A) est relatif à des valeurs faibles de probabilités de mutation, celui du bas (B) à des valeurs fortes. La première ligne de chaque panneau $pr(E_{SP}=1)$ 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 toutes 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 5e et 95e percentiles.

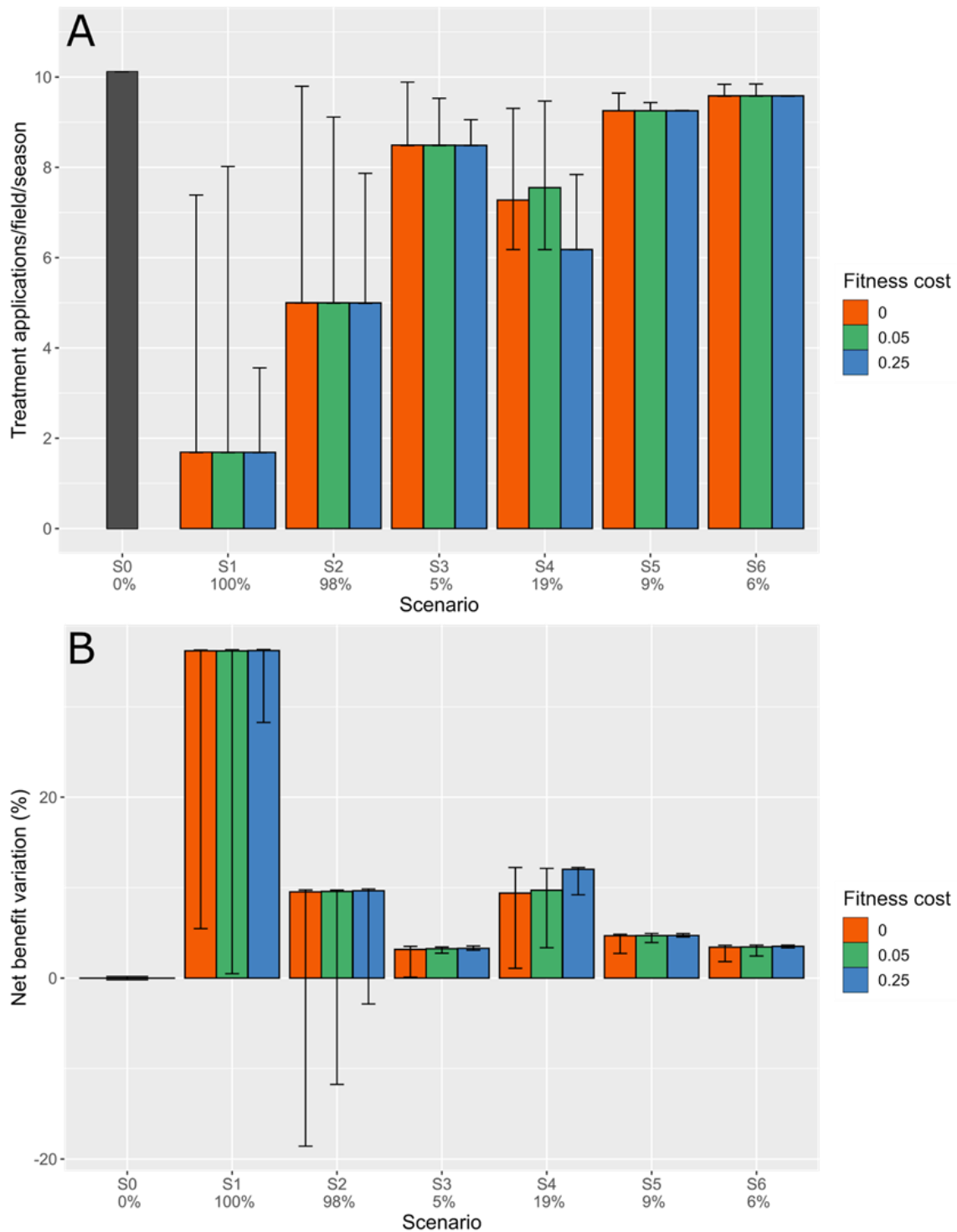


Figure 4 : Impacts environnementaux et économiques des six scénarios de déploiement retenus à l'issue des ateliers. A: Nombre de traitements par parcelle et par saison de culture pour les 6 scénarios. Les simulations ont été réalisées dans le paysage "Cœur du vignoble" du territoire de la coopérative, 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 calculée par rapport au scénario de référence S0 (replantation uniquement avec des variétés sensibles).



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

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Frédéric Fabre : <https://orcid.org/0000-0001-8271-7678>

Adeline Alonso Ugaglia : <https://orcid.org/0000-0003-4520-3330>

Contributions des auteurs

Obtention du financement : FF, AAU

Conceptualisation, Recherche, Analyse formelle et Méthodologie: FF, ASM, LR, MZ, JP, JFR, AAU

Développement informatique : LR, MZ, JP, JFR

Rédaction - version originelle : FF, ASM, LR, MZ, AAU

Rédaction - Révision et correction : FF, ASM

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas ne travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements



Nous tenons à remercier l'équipe de la cave coopérative « Nous, les vignerons de Buzet » (Pierre Philippe, Carine Magot, Carine Galante, Sébastien Bourguignon) pour leur accueil et les riches discussions, l'agence Think+ (Vincent Collet, Hélène Lovato) pour l'animation des ateliers, Gautier Sabrià pour son analyse sociologique, et Louise Plantin pour la facilitation graphique durant les ateliers et la réalisation de la BD.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a bénéficié du soutien financier du projet Ecophyto II APR Levier Territoriaux MEDEE (numéro SIREPA 4621) financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) et du projet ANR COMBINE (référence ANR- 22-CE32- 0004).

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
- 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
- OSCAR, 2023. Observatoire nationale du déploiement des Cépages Résistants – synthèse 2022, 13p.
- 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>
- Plantin L., Miclot A.S., Papaix 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., Papaix 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., Papaix 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., Papaix 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 paraitre 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.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.