

# M É D É E

Vers des Mosaïques agricoles économes en pesticides : de la modélisation à la concertation territoriale pour le Déploiement des cépages Résistants

## Responsable scientifique



**Frédéric Fabre**  
INRAE UMR SAVE  
frederic.fabre@inrae.fr

Frédéric Fabre, chercheur INRAE, travaille sur l'épidémiologie et l'évolution des agents pathogènes des plantes, notamment les champignons et les phytoplasmes de la vigne. Les applications concernent la gestion durable des variétés résistantes aux maladies et sur l'épidémiosurveillance du vignoble.

## Partenaires

- ◆ INRAE UMR SAVE, UR pathologies, UR Biops
- ◆ Cave coopérative « Les vigneron de Buzet »

## Financements

**Coût total du projet : 376 353 €**  
**Montant de la subvention OFB : 158 617 €**

## Le projet en bref

Nous avons développé un modèle mathématique couplant les mécanismes de l'épidémiologie végétale et les analyses économiques pour simuler des scénarios de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans des paysages viticoles réels. Ces scénarios sont évalués pour leurs effets sur le contrôle des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction des traitements et leurs performances économiques. Ce modèle a été utilisé avec les équipes de la cave coopérative « Nous les vigneron de Buzet » au cours de 4 ateliers pour co-construire et comparer des stratégies de déploiement des variétés résistantes sur les 1935 ha (soit 95% de l'AOC Buzet) du territoire de la coopérative.

Cépages résistants

Gestion durable des résistances

Mosaïques territoriales

Ateliers participatifs

Modélisation



## Contexte et principaux objectifs

Réduire l'usage des fongicides est un enjeu majeur en viticulture. L'obtention de variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium est une innovation des plus prometteuses, ces maladies entraînant près de 80% des traitements sur cette culture. Un des enjeux de leurs déploiements sur le terrain réside dans la gestion de la durabilité des résistances. Cette gestion nécessite une coordination entre les sélectionneurs, qui créent les variétés, et les agriculteurs (et leurs organisations), qui les déploient. Du côté des sélectionneurs, l'obtention de variétés pyramidant (i.e. cumulant) plusieurs facteurs de résistances favorise la durabilité. Ce choix a guidé le travail de sélection conduit depuis les années 2000 par INRAE et l'IFV (*programme ResDur*). Il s'est concrétisé en 2018 par la commercialisation des premières variétés de vigne « pyramidées » (*variétés ResDur1 : Artaban, Floréal, Voltis et Vidoc*) qui cumulent notamment les gènes de résistance au mildiou Rpv1 et Rpv3. Toutefois, cette même année, d'autres variétés résistantes issues de programmes européens plus anciens ont également été autorisées alors qu'elles ne disposent que du seul gène Rpv3. Ainsi, peuvent aujourd'hui potentiellement coexister sur un même bassin viticole des variétés avec des résistances polygéniques (gènes Rpv1 et Rpv3) et monogéniques (gènes Rpv3 en particulier). Cette coexistence pourrait compromettre l'efficacité du toit polygénique offert par les variétés pyramidées. Aussi, les choix variétaux à venir des viticulteurs sont très importants. Une partie du succès des variétés résistantes se joue à cette étape et conditionne le succès des futures obtentions.

Dans ce contexte, nous avons développé dans une première partie du projet **un modèle mathématique** couplant les mécanismes de l'épidémiologie végétale et les analyses économiques pour simuler des scénarios de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans des paysages viticoles réels. Ces scénarios sont évalués pour leurs effets sur le contrôle des épidémies, la durabilité des résistances, la réduction des traitements et leurs performances économiques.

Puis, dans une seconde partie, **ce modèle a été utilisé avec les équipes** de la cave coopérative « *Nous les vigneronns de Buzet* » qui fédère 160 producteurs sur 1935 ha de vigne, soit 95% de l'AOC Buzet. Au cours de **4 ateliers d'une matinée chacun**, nous avons co-construit et comparé six stratégies possibles de déploiement des variétés résistantes sur ce territoire viticole.



Illustrations tirée de la BD créée lors du projet Médée. Cette BD est publiée ici <https://hal.inrae.fr/hal-04604456> (Plantin et al, droit CC BY-NC-ND 4.0)



## Principaux résultats en lien avec le plan Ecophyto

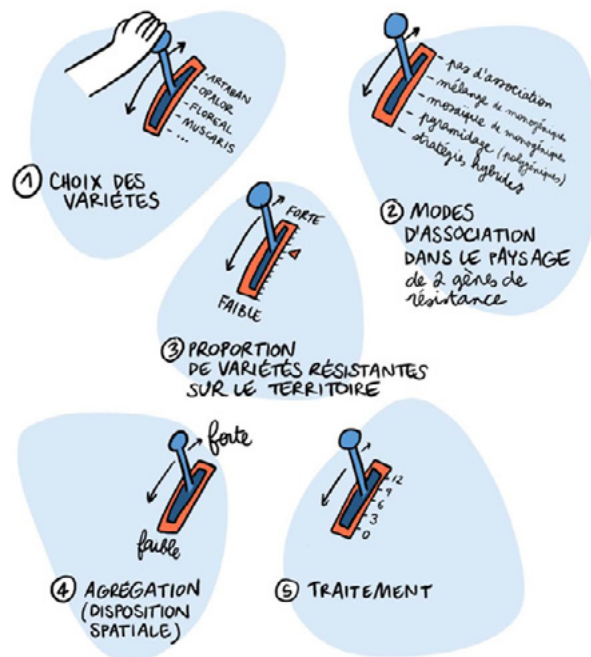
**Développement d'un modèle pour simuler des stratégies de déploiement des variétés de vigne résistantes au mildiou dans les territoires viticoles.** Cette partie repose sur le modèle Landsepi qui simule la propagation et l'évolution d'un agent pathogène dans un paysage agricole cultivé avec un ensemble de variétés résistantes et sensibles. Il a été initialement développé pour le déploiement de variétés de blé résistantes aux rouilles. Plusieurs fonctionnalités ont été rajoutées à Landsepi. 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. Ce régime de reproduction, caractéristique du mildiou de la vigne, peut en effet accélérer l'adaptation des agents pathogènes aux variétés résistantes. Nous avons ensuite proposé un paramétrage spécifique du mildiou de la vigne en mobilisant des données de la bibliographie (18 références) et du réseau OSCAR (Observatoire national du déploiement des cépages résistants). Par la suite, nous avons ajouté un module simulant l'effet de traitements fongicides sur le contrôle de la maladie, ces traitements étant déclenchés en fonction d'un seuil de sévérité de la maladie. Cette fonctionnalité permet désormais de calculer les indices de fréquences de traitements (IFT) dans Landsepi. Pour finir, nous avons introduit un module d'analyse coût-bénéfice des stratégies de déploiement prenant en compte plusieurs spécificités de la filière viticole (coût des plantations, baisse du prix d'achat en fonction de l'état sanitaire des parcelles...).

**La coexistence dans un même territoire de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques compromet la durabilité.** Fruit d'une étude théorique basée sur le modèle précédent, ce résultat suggère que, dans la plupart des

configurations analysées (qui sont autant d'états possibles de la nature), l'efficacité et la durabilité des variétés pyramisant les gènes Rpv3 et Rpv1 sont compromis dès lors qu'elles sont cultivées, même en faible proportion, avec des variétés monogéniques partageant certains facteurs de résistances.

**Co-construction et étude comparative de stratégies de déploiement dans le territoire de l'AOC Buzet.** Lors de 4 ateliers avec la cave coopérative « Nous les vigneronns de Buzet », organisés sur une base mensuelle autour du printemps 2023, le modèle a d'abord été utilisé pour illustrer les questions relatives à la durabilité des variétés résistantes. Ce premier atelier fut également l'occasion de riches échanges sur la multiplicité des enjeux auxquels se confronte une coopérative

**DONC, DANS CE MODÈLE, VOUS POUVEZ UTILISER 5 LEVIERS POUR DÉFINIR VOTRE STRATÉGIE DE DÉPLOIEMENT :**



Illustrations tirées de la BD créée lors du projet Médée. Cette BD est publiée ici <https://hal.inrae.fr/hal-04604456> (Plantin et al, droit CC BY-NC-ND 4.0)



dans l'optique du déploiement de ces variétés. Des approches de facilitation ont ensuite été mobilisées pour identifier avec les équipes de la cave six scénarios de déploiement à tester sur leur territoire (par exemple replanter avec des variétés résistantes les parcelles âgées de plus de 30 ans jusqu'à 5 % de surface/exploitants, cultiver ces variétés dans les zones non-traitées aquatiques...). Les scénarios, simulés dans 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.

## Perspectives futures en termes de transfert ou de recherche

### Transfert

Les ateliers participatifs sont des lieux d'échange mutuellement bénéfiques entre professionnelles de terrain, pour s'approprier les facteurs influençant la durabilité des résistances variétales, et chercheurs, pour préciser - voir modifier - leurs hypothèses de travail. Dans ces échanges, la possibilité de réaliser en direct des simulations de déploiement de variétés résistantes dans des parcellaires réels joue un rôle majeur de facilitation.

Si le déploiement des variétés résistantes permet dans tous les scénarios analysés de réduire les traitements, la réglementation actuelle des VIFA contraint fortement les économies réalisées en limitant substantiellement les possibilités de plantation.

### Recherche

Nos simulations sur la coexistence de variétés avec des résistances monogéniques et polygéniques montre la sensibilité des résultats présentés à l'existence de coûts d'adaptation (sur l'ensemble des variétés considérées, sensibles comme résistantes) et à la fréquence de mutation des agents pathogènes vers des phénotypiques adaptés aux résistances. Il est donc important de caractériser finement ces paramètres par des expérimentations dédiées. C'est un des objectifs du projet ANR COMBINE qui fait suite aux travaux initiés ici. Une autre perspective serait de modéliser conjointement dans Landsepi l'adaptation des agents pathogènes aux variétés résistantes et aux fongicides.



## Livrables, valorisation et transfert réalisés

### Journées techniques et colloques scientifiques

◆ Présentation orale: Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaix J., Rey J-F., Delière L., Miclot A-S., Alonso Ugaglia A., Fabre F. 2024. Multicriteria evaluation of landscape strategies to deploy monogenic and pyramided resistances against grapevine downy mildew. Presented at : Rencontre annuelle du projet PPR VITAE, 12-14 mars 2024, Cognac.

### Conférences scientifiques et techniques, avec et sans actes

◆ Poster: Rimbaud L., Papaix J., Rey J. F., Gausсен J. L., Zaffaroni M., Fabre F. 2022. Modelling plant resistance deployment : the R package landsepi. Présenté à : 15th International Symposium of Plant Virus Epidemiology, 5-8 juin 2022, Madrid (Espagne).

◆ Poster: Zaffaroni M., Rey J. F., Rimbaud, L., Papaix, J., Fabre, F. 2022. Disentangling the effects of genetic recombination and dormancy linked to pathogen sexual reproduction on the effectiveness and durability of resistance deployment strategies. Présenté à : Petit Pois Déridé 2022, 30 mai- 1 juin 2022 Villeneuve d'Ascq (France).

◆ Poster: Zaffaroni M., Miclot A.-S., Paineau M., Demeaux I., Bourg J., Couture C., Delière L., Delmotte F., Fabre F. 2022. Genotypes x genotypes cross-inoculation experiments to assess the effectiveness of grapevine resistance factors Rpv1 and Rpv3 to *Plasmopara viticola*, the grapevine downy mildew agent. Presented at : Petit Pois Déridé, Villeneuve d'Ascq, France (2022-05-30 - 2022-06-01), <https://hal.inrae.fr/hal-04427182>

◆ Poster: Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaix J., Rey J.-F., Deliere L., Miclot A.-S., Ugaglia A., Fabre F. 2023. Epidemiological, evolutionary and economic outcomes associated to the coexistence of monogenic and pyramided resistant cultivars in agricultural landscapes: a case-study with the ma-

nagement of downy mildew in wine growing areas. Presented at : 12th International congress of plant pathology (ICPP), Lyon, France (2023-08-20 - 2023-08-25), <https://hal.inrae.fr/hal-04195663>,

◆ Poster: Zaffaroni M, Miclot AS, PaineauM, Demeaux I, Bourg J, Couture C, Delière L, Delmotte F, Fabre F. 2022. Genotypes x genotypes cross-inoculation experiments to assess the effectiveness of grapevine resistance factors Rpv1 and Rpv3 to *Plasmopara viticola*, the grapevine downy mildew agent. Présenté à : Rencontre Jean-Chevauchon, Aussois, 12-16 septembre 2022.

◆ Présentation orale: Zaffaroni M, Rey JF, Rimbaud L, Papaix J, Fabre F. 2022. Disentangling the effects of pathogen sexual reproduction on the effectiveness and durability of resistance deployment strategies: *Plasmopara viticola* as a case study. Présenté à : International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildews (GDPM 2022), 20-22 juillet 2022, Cremona (Italie). DOI: 10.1051/bioconf/20225004001.

◆ Présentation orale: Zaffaroni M., Rey J-F., Rimbaud L., Papaix J., Fabre F. 2023. - Effects of pathogen sexual reproduction on the evolutionary and epidemiological control provided by deployment strategies for two major resistance genes in agricultural landscapes. Presented at : 12th International congress of plant pathology (ICPP), Lyon, France (2023-08-20 - 2023-08-25).

◆ Présentation orale: Zaffaroni M., Rimbaud L., Papaix J., Rey J-F., Delière L., Miclot A-S., Alonso Ugaglia A., Fabre F. 2024. Multicriteria evaluation of landscape strategies to deploy monogenic and pyramided resistances against grapevine downy mildew. Presented at : Journée Jean Chevaugéon, 15-19 janvier 2024, Aussois. <https://hal.inrae.fr/hal-04427255>

### Présentation à des instances professionnelles ou de décision

◆ Quatre ateliers (24 janvier 2023, 9 mars 2023, 4 avril 2023 et 16 mai 2023 ; 3h chacun) d'échanges avec la cave-coopérative « Nous les vignerons de Buzet ».



### Publications scientifiques

♦ Zaffaroni M., Rimbaud L., Rey J-F., Papaix 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., Papaix J., Rimbaud L., Geffersa A., Rey J-F., 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. En révision pour *Phytopathology*, <https://doi.org/10.1101/2024.02.14.580232>

♦ Zaffaroni M., Fabre F., Miclot A.-S., Rimbaud L., Alonso Ugaglia A. Deployment of resistant grapevines decreases fungicide treatments and increases net benefit of a cooperative winery: insights from a participative science project. En cours de rédaction.

### Articles de valorisation/vulgarisation :

♦ Une BD de vulgarisation de la démarche : Plantin L., Miclot AS., Papaix 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>

### Autres valorisations

♦ Mise à disposition du modèle mathématique Landsepi 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>).

♦ Formation d'un groupe de quatre étudiants ingénieurs de Bordeaux Sciences Agro aux enjeux du déploiement des variétés résistantes à l'occasion d'enquêtes menées auprès de viticulteurs et de clients de la cave coopérative de Buzet au printemps 2023, en parallèle des ateliers.