

# Vigne : quid de la stimulation associée à la résistance variétale ?

Il existe des outils pour caractériser les défenses de la plante, la résistance variétale ou l'effet d'une stimulation. Une évaluation de l'efficacité de ces deux leviers de protection combinés a été menée.

**MARIE-FRANCE CORIO-COSTET<sup>(1)</sup>, MARIE LAURENS<sup>(1)</sup>, ENORA BODIN<sup>(1)</sup>, JOSEP VALLS<sup>(2)</sup>, STÉPHANIE CLUZET<sup>(2)</sup> ET ADRIEN DARROMAN<sup>(1)</sup>** (1) Inrae - UMR Save Bordeaux. (2) Université de Bordeaux - MIB

**P**our limiter l'utilisation de fongicides de synthèse, et réduire les doses appliquées, différents leviers peuvent être utilisés (Figure 1), parmi lesquels les substances stimulant les défenses des plantes (exemples : extrait d'algues, analogue de l'acide salicylique, extraits de levure...). Ces dernières peuvent s'utiliser sur des cépages sensibles ou partiellement résistants aux bioagresseurs. Différentes questions se posent : les mécanismes de résistance génétique ont-ils des similitudes avec la stimulation des défenses chez une variété sensible ? Comment répond une variété résistante quand on la stimule ? Peut-on mieux comprendre la résistance et la protection conférées par une stimulation des défenses ?

## Limiter les fongicides en vigne Une stratégie basée sur l'immunité

Concernant une culture pérenne, comme la vigne, limiter l'utilisation des fongicides antimildiou et anti-oïdium sur une variété sensible, selon les conditions climatiques et l'importance des pressions épidémiques, peut se révéler périlleux. La lutte antimildiou représente aujourd'hui 60% des indicateurs de fréquence de traitement (IFT), et représente une réelle préoccupation si l'on veut réduire les quantités de produits phytopharmaceutiques (PPP), qu'ils soient de synthèse ou non. Combiner des leviers constitue



Boutures foliaires de variété sensible en serre.

donc une voie à explorer, en particulier, celle associant l'utilisation de phytostimulants (au sens large) capables de stimuler les défenses de la plante (SDP) et/ou de stimuler sa croissance (biostimulant, BS), soit avec des produits phytopharmaceutiques à doses réduites, soit à avec des variétés résistantes. *In fine*, il s'agira de stimuler l'immunité de la vigne et de caractériser les stratégies de défenses des *Vitis*, pour se diriger vers une protection multipathogènes. Ainsi, pour les variétés à résistance partielle sera-t-il possible de compléter leur efficacité vis-à-vis d'agents pathogènes comme l'oïdium et le

mildiou, voire potentiellement d'accroître la durabilité de leur résistance.

## Des mécanismes de défense sous-tendus par la génétique

La création d'une variété résistante provient généralement de l'introgession de traits de résistance (« quantitative trait loci » ou QTL) en les pyramidant, par croisements successifs entre des espèces de *Vitis* résistantes, ou de variétés résistantes de *V. vinifera*, avec des variétés sensibles plus qualitatives.

Cependant, les mécanismes finaux de la défense ne sont pas toujours bien connus selon la variété considérée. Plusieurs mécanismes peuvent conduire à de la résistance variétale, et divers caractères peuvent intervenir (phénologiques, morphologiques, biochimiques), tous sous-tendus par la génétique de la plante. En absence de toute stimulation, il est décrit que les variétés résistantes synthétisent différentes molécules antimildiou (exemple : ptérostilbène, viniférines...), des enzymes hydrolytiques, ou bien modulent leurs cires épicuticulaires les rendant plus résistantes à l'oïdium de la vigne<sup>(1)</sup>, voire émettent des produits volatiles en plus grandes quantités que les cépages sensibles qui auraient des effets antimildiou<sup>(2)</sup>.

Globalement, le lien entre les mécanismes de défenses et l'efficacité contre les bioagresseurs n'est pas toujours bien caractérisé selon la variété. Récemment, l'étude menée par Calonne *et al.* (2021) a mis en évidence des expressions de gènes caractéristiques

## RÉSUMÉ

♦ **CONTEXTE** - Dans l'objectif de diminuer l'usage des produits fongicides en viticulture, il semble intéressant de combiner la stimulation des défenses et la résistance variétale. Encore faut-il pouvoir comprendre et caractériser les mécanismes en jeu.

♦ **OUTILS** - La méthode BioMolChem permet de suivre et d'évaluer l'effet d'une stimulation des défenses dans différentes conditions, sur des cépages résistants ou sensibles.

♦ **RÉSULTATS** - Une stimulation des défenses peut conduire à

une surproduction de polyphénols, mais cette augmentation globale ne suffit pas à expliquer la protection. La qualité des polyphénols présents est primordiale (exemple : accumulation de ptérostilbène antimildiou). De nombreux gènes impliqués dans la défense de la

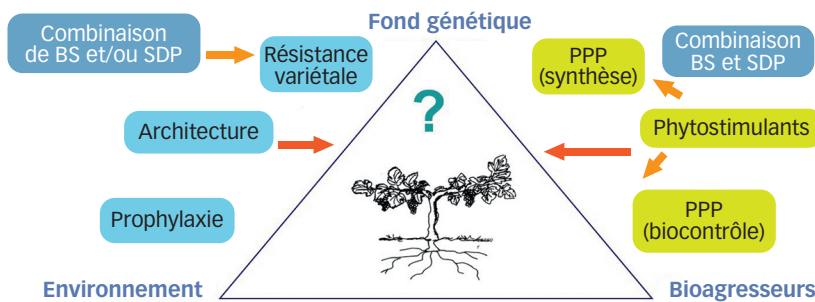
plante sont surexprimés dans les variétés résistantes, mais seuls quelques-uns sont des marqueurs de protection. Une stimulation des défenses tend à homogénéiser les réponses de l'ensemble des cépages, avec les sensibles qui surexpriment plus les gènes de la

voie de biosynthèse des polyphénols et quelques gènes de PR protéines, conduisant à de la protection contre *Plasmodiopsis viticola*.

♦ **MOTS-CLÉS** - Résistance variétale, vigne, stimulation des défenses, immunité.

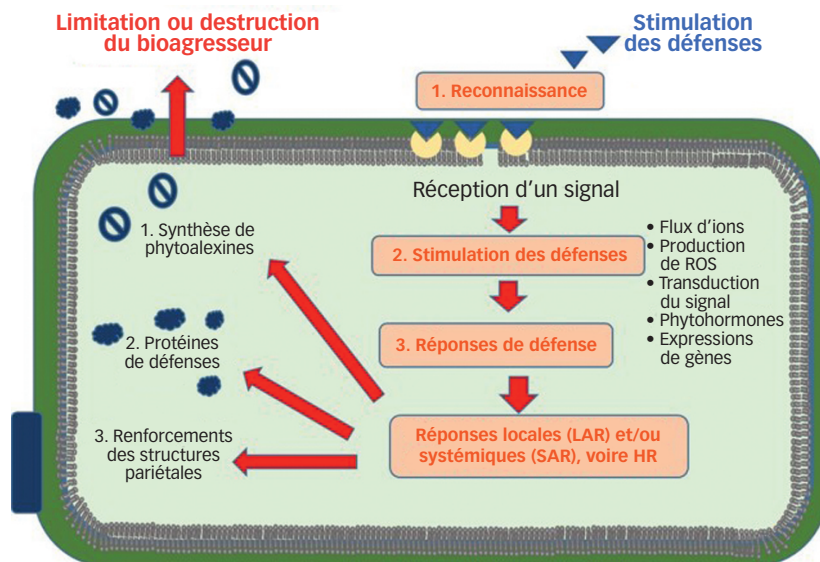
### Fig. 1 : Leviers à exploiter associant la résistance variétale et/ou des produits phytopharmaceutiques (PPP) avec des phytostimulants (stimulateurs des défenses des plantes SDP ou biostimulants BS) dans l'agrosystème viticole

Flèches rouges = leviers utilisés en viticulture. Flèches orange = leviers à utiliser en combinaisons (phytostimulants).



### Fig. 2 : Lignes de défense d'une cellule végétale lors d'une stimulation des défenses

Les trois principales réponses moléculaires sont illustrées : 1. Production de phytoalexines (stilbènes, flavonoïdes, volatils...). 2. Production de protéines de défense (chitinasés, protéines PR...). 3. Renforcement des parois cellulaires. HR : réponse d'hypersensibilité. LAR : local acquired resistance (résistance locale acquise). PR : pathogenesis proteins (PR protéines). SAR : systemic acquired response (réponse systémique acquise). ROS : reactive oxygen species (espèces réactives d'oxygène).



d'une variété en absence ou en présence d'un agent pathogène<sup>(3)</sup>.

### Les lignes de défenses d'une vigne stimulée

#### Stimulation des défenses ne veut pas dire protection assurée

Stimuler les défenses d'une plante est un mécanisme largement décrit dans la litté-

rature et l'utilisation de SDP s'est élargie à de nombreuses cultures (RMT Elicitra<sup>(4)</sup>), avec des modes d'action aux niveaux moléculaire et biochimique qui commencent à être bien connus (Figure 2). Cependant, l'impact d'une stimulation des défenses sur la protection est souvent moins bien maîtrisé, en partie lié à la réponse de la plante (son état physiologique), qui est soumise

à diverses pressions environnementales. Généralement, les défenses induites par stimulation font appel à trois lignes de défense (Figure 2) :

- le renforcement de structures pariétales (paroi, cuticule) ;
- la production d'enzymes hydrolytiques qui inhibent ou dégradent une fonction de l'agent pathogène ;
- la production de molécules antifongiques (phytoalexines, composés volatils).

Ces défenses peuvent se produire au niveau local (LAR), ou systémique (SAR) avec une diffusion dans la plante entière, et peuvent parfois conduire à une réponse d'hypersensibilité (hypersensitive response-HR), avec des zones cellulaires nécrosées.

### Mieux comprendre la stimulation des défenses

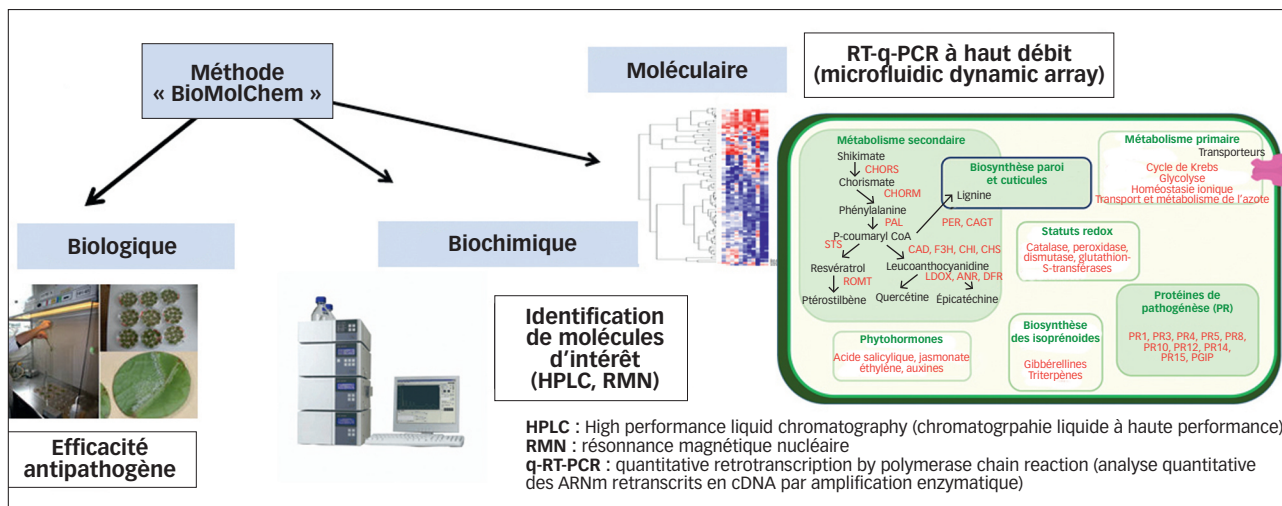
Pour évaluer l'amplitude des défenses induites, mieux comprendre les mécanismes mis en œuvre, et *in fine* l'efficacité de protection, l'Inrae UMR Save a mis au point la méthode BioMolChem (Encadré 1 page suivante) qui permet de suivre et d'évaluer l'effet d'une stimulation des défenses dans différentes conditions (au cours du temps, après infection, associée à un stress, etc.). De nombreux essais montrent qu'un SDP remplace rarement un traitement fongicide classique, mais il peut en augmenter l'efficacité et permettre d'en diminuer la dose. Un concept similaire a été développé pour les variétés résistantes, afin d'améliorer leur niveau de protection à différents agents pathogènes. La méthode BioMolChem a été utilisée au laboratoire et au vignoble, dans un premier temps sur des variétés sensibles, pour optimiser l'application et les effets de protection des SDP sur la vigne (Corio-Costet *et al.*, 2013 ; Dufour *et al.*, 2016 ; Burdziej *et al.*, 2021<sup>(5) (6) (7) (8) (9)</sup>). Des efficacités intéressantes contre l'oidium, le mildiou, voire le botrytis et les maladies du bois ont été obtenues. Pour tester le concept sur les variétés résistantes, la méthode a ensuite été utilisée sur cinq variétés résistantes (codées R, S, P, A V) possédant différents traits de résistance (QTL) et deux variétés sensibles (codées C, M).

### Variétés résistantes vs variétés sensibles stimulées

#### Quelle réaction après une stimulation ?

L'efficacité d'un SDP contre l'oidium et le mildiou appliqué à 0,5 g/l, 24 h avant l'inoculation des agents pathogènes, a été mesurée sur dix étages foliaires différents (Figure 3). Si le niveau de protection contre *Plasmopara viticola* est augmenté significativement chez les variétés sensibles (C et M), cela reste une tendance pour les variétés résistantes, par ailleurs peu sensibles au mildiou. Concernant l'oidium, le traitement SDP montre une faible efficacité, souvent

### 1 – La méthode BioMolChem pour suivre et évaluer l'effet d'une stimulation



La méthode BioMolChem consiste en une triple approche, biologique, moléculaire et biochimique pour évaluer les réponses de défenses du végétal et le niveau de protection contre différents agents pathogènes de la vigne (Corio-Costet *et al.*, 2013 ; Dufour *et al.*, 2016 ; Bellée *et al.*, 2018, Burdziej *et al.*, 2021). Ainsi, l'approche biologique multipatho-

gène permet d'évaluer le niveau de protection. L'approche moléculaire renseigne sur les modulations de différentes voies métaboliques impliquées (ou non) dans les réponses de défenses. Et l'approche biochimique qui qualifie et/ou quantifie des molécules d'intérêt (stilbènes, flavonoïdes, hormones...) permet de corréliser des expressions de gènes avec la produc-

tion de molécules et/ou avec le niveau de protection. Cette méthode permet ainsi de qualifier l'état de défense, voire physiologique de la plante. Le développement de la méthode avec la puce de q-RT-PCR à haut débit a bénéficié du soutien de la société De Sangosse dans le cadre du FUI Neoprotec et du financement de deux thèses Cifre (A. Bellée et E. Bodin).

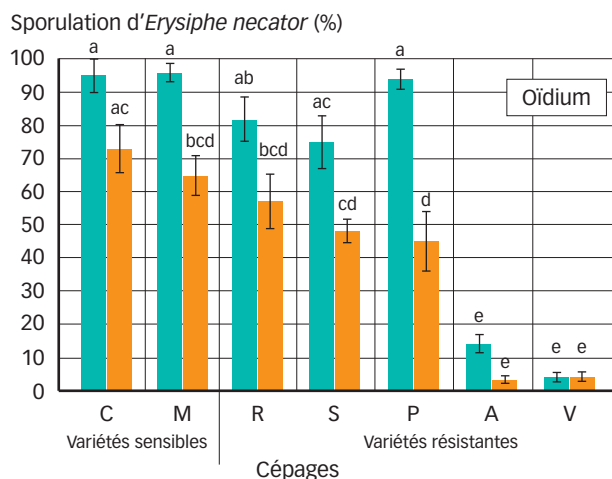
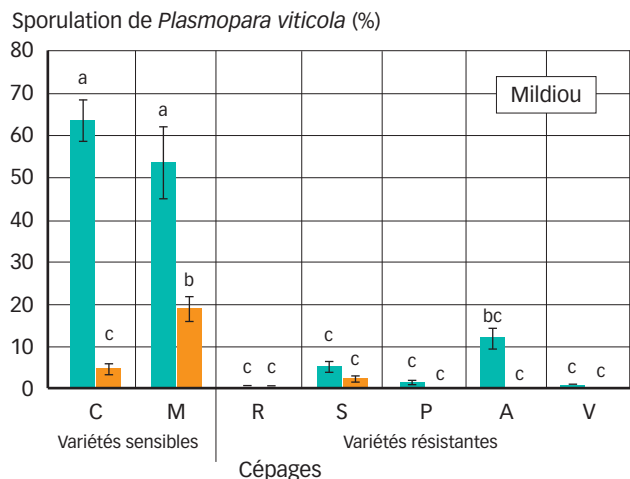
peu significative, excepté pour le cépage P et le cépage sensible (M), dans nos conditions expérimentales, en partie liée au court délai d'action du SDP avant l'inoculation (24 h). Si le délai entre le traitement et l'inoculation

augmente, de deux à neuf jours, l'efficacité de protection augmente progressivement pouvant atteindre 100%, selon le SDP considéré, tant chez les variétés sensibles que résistantes, puis diminue à nouveau. Ce

point est important en particulier pour l'utilisation des SDP *in natura*, confirmant qu'il faut effectuer des traitements en préventif. De plus, au vignoble si l'association d'un SDP avec une demi-dose de produits donne

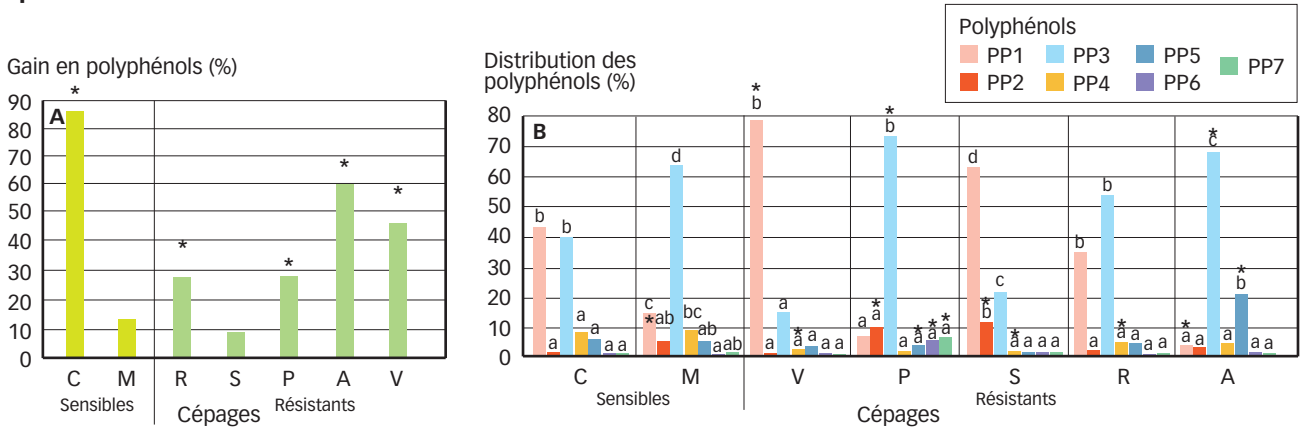
**Fig. 3 : Développement de *Plasmopara viticola* (mildiou) et d'*Erysiphe necator* (oïdium) sur des feuilles de différents cépages de vigne sensibles et résistants**

**En bleu** = croissance moyenne sur dix niveaux foliaires pour chaque cépage en l'absence de traitement. **En orange** = croissance moyenne sur dix niveaux foliaires, 24 heures après un traitement avec un SDP (analogue de l'acide salicylique).





**Fig. 4 : Gain relatif en sept polyphénols après une stimulation des défenses dans différents cépages, exprimé en pourcentage ; et distribution des sept polyphénols (PP en %) au sein de chaque cépage 24 h après la stimulation avec un SDP**



généralement de bons résultats, l'alternance entre produits et SDP est souvent aussi efficace, voire parfois meilleure, limitant les potentiels effets antagonistes possibles entre un produit et un phytostimulant SDP.

**Mécanismes de défenses en jeu dans les variétés résistantes**

Certains cépages résistants avant stimulation contiennent déjà d'importantes quantités de polyphénols totaux, jusqu'à 2,8 fois

plus que le cépage sensible C (exemple : les variétés résistantes P et S). Par ailleurs, certains cépages résistants sont plus riches en flavonoïdes que les autres (exemple : variété S), ou en stilbènes très spécifiques, tel que le ptérostilbène, bien connu pour son activité antimildiou (exemple : variété P). D'autres composés peuvent intervenir (volatils, enzymes...) et d'autres mécanismes. Une stimulation des défenses peut conduire à une surproduction de polyphénols (Figure 4A), telle que nous la notons pour sept polyphénols étudiés dans les feuilles. En effet, si nous comparons les teneurs avant stimulation et 24 h après le traitement, l'augmentation varie de 7 à 83 % selon le cépage considéré. Ce gain global peut être important ou non, tant pour les cépages sensibles (C vs M), que résistants (A vs S). Cette augmentation globale des polyphénols ne suffit cependant pas à expliquer la protection. Le type de molécule et les quantités présentes jouent un rôle primordial dans la protection.

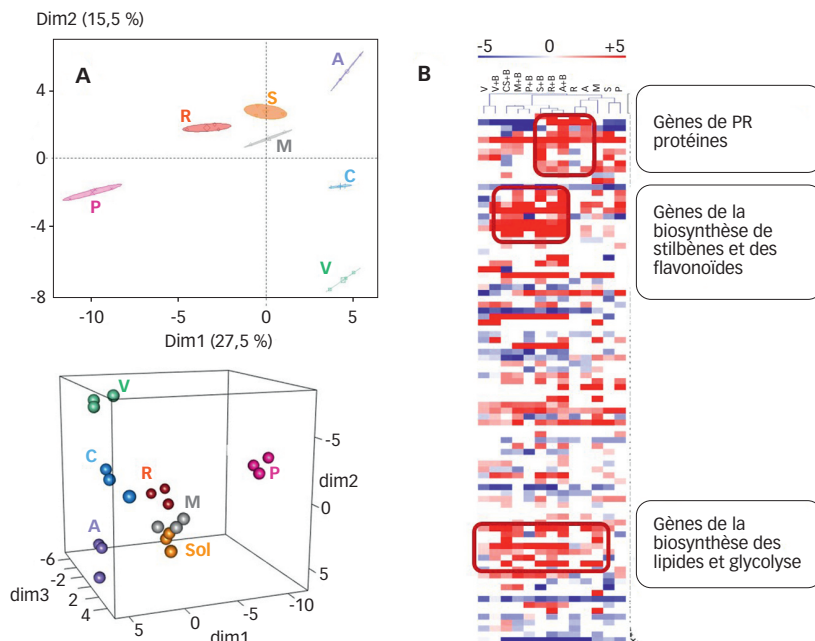
Un examen plus approfondi des sept polyphénols révèle une grande variabilité quantitative (Figure 4B). En effet, les cépages résistants présentent pour la plupart un profil qualitatif et quantitatif particulier, avec par exemple les produits PP6 et PP7 présents en grande quantité dans le cépage résistant P, ou le produit PP5 très présent dans le cépage A, ou encore PP2 dans le cépage S. À noter que PP4 est surtout présent dans les cépages sensibles.

Si les polyphénols sont des acteurs directs de la protection contre des agents pathogènes, il est clair qu'il ne suffit pas de montrer une augmentation des quantités totales, mais qu'il est nécessaire de s'intéresser à la molécule présente qui a, ou pas, un effet antimildiou (par exemple ptérostilbène). À noter que le cépage cabernet-sauvignon, après une stimulation ou une attaque de

**Fig. 5 : Visualisation des différences d'expression des 95 gènes dans les différents cépages**

**A. Analyse en composantes principales (ACP)** de l'expression de 95 gènes de la puce NéoStim des sept cépages non traités, sur les deux ou trois principales dimensions après projection de l'ensemble des données dans un espace pluridimensionnel selon les modalités.

**B. Clustering hiérarchique** (regroupement de l'expression des gènes selon les similitudes d'expression dans les feuilles des différentes modalités) de l'expression des 95 gènes pour l'ensemble des cépages après ou non traitement avec le SDP. Plus la couleur est rouge intense, plus le gène est surexprimé, plus le bleu est foncé, plus le gène est réprimé par rapport à la modalité témoin.



## 2 – Une ACP ou AFM ?

L'ACP, analyse en composantes principales, permet de visualiser des corrélations entre des variables et de visualiser des observations (ici l'expression de 95 gènes indépendamment) projetées dans différentes dimensions. Cette méthode permet de réduire le nombre de variables appliquées aux différents cépages pour simplifier les observations, tout en conservant un maximum d'informations. Généralement l'information associée aux deux ou trois variables dites « composantes principales » représente un pourcentage suffisant de la variabilité du nuage de points. L'ACP est représenté sur un graphique à deux ou trois dimensions, facilitant l'interprétation des données (ici plus de 8 000 data). Cette analyse permet d'identifier des groupes homogènes d'observations ou au contraire des observations atypiques (variables expliquées qui permettent de caractériser les différents cépages) à l'aide du cercle des variables projetées (non montré ici). L'ACP vise à expliquer la plus grande variance possible par le plus petit nombre de composantes principales (ici deux à trois).

L'AFM, analyse à facteurs multiples, décrit plusieurs ensembles de variables (qualitatives et/ou quantitatives) structurés en groupes, et attribue à chacun de ces groupes un poids égal. Elle a aussi pour avantage de pouvoir intégrer des variables qualitatives (par exemple les phénotypes décrits en « absence »/« présence »). À la base, l'AFM repose sur une analyse factorielle (ACP pour les variables quantitatives) où les variables sont donc pondérées.

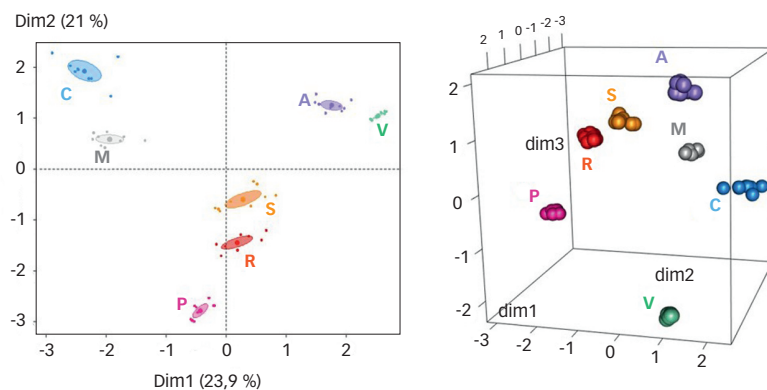
pathogènes, produit d'importantes quantités de polyphénols mais sans conduire à de la protection (exemple : accumulation de picéide et resvératrol et absence de ptérostilbène). Quantifier les polyphénols totaux ne permet généralement pas de renseigner sur le niveau de protection de la vigne.

### Action de la stimulation sur l'expression de gènes de défense

Les expressions relatives de 95 gènes (puce Néovigen améliorée [Néostim]) ont été analysées en haut débit (qRT-PCR, technologie Fluidigm,  $\geq 8800$  données) pour tous les cépages dans différentes conditions (avec

**Fig. 6 : Analyses multifactorielles (AFM) de l'ensemble des cépages sensibles et résistants, intégrant l'expression de 95 gènes et leur sensibilité à *Plasmopara viticola* et *Erysiphe necator* avec les deux ou trois principales dimensions**

Les données acquises qualitatives et quantitatives sont pondérées et l'analyse permet de visualiser la projection de l'ensemble des données dans un espace multidimensionnel, avec les dimensions principales qui sont celles expliquant le plus de variabilité.



ou sans traitement SDP, avec ou sans inoculation avec *P. viticola* ou *E. necator* de la vigne, etc.). Les analyses d'expression de gènes sous la forme de projection dans un espace infini de chaque expression de tous les gènes selon les modalités (Analyses en composantes principales-ACP) (Figure 5A, Encadré 2) permettent de visualiser les corrélations entre les expressions de gènes (visualisation de 8000 données en un graphe). Cette analyse permet de différencier significativement le fonctionnement de chaque cépage et 55% de la variabilité s'explique par la modulation des gènes sur les trois axes principaux. Ainsi, est-il possible de caractériser *via* ces marqueurs le fonctionnement génétique des différents cépages. Par exemple, le cépage A possède une régulation du cycle de Krebs qui lui est propre, et il surexprime toujours certains gènes PR (PR3, PR4), de même que le cépage P surexprime fortement le gène GST3 (une glutathion-S-transférase, système d'oxydo-réduction), comme déjà décrit dans Calonnec *et al.*, 2021<sup>(3)</sup>. Pour chaque variété résistante, il est possible de trouver un profil d'expression spécifique et/ou commun avec un autre cépage résistant qui contient des traits de résistance communs (exemple : parenté proche ou QTL identique). Outre les gènes codant pour des voies de défense et de protection, certaines voies sont particulièrement modulables chez les variétés résistantes, comme celles des gènes de la régulation du transport d'eau (aquaporines) ou du métabolisme hormonal (exemple : cytokinines).

L'analyse statistique par regroupement des différentes modalités selon les similitudes

d'expression de gènes (Figure 5B), après traitement ou non avec un SDP, des sept cépages, permet de visualiser les différences et conduit à trois groupes (clusters) : un premier spécifique du cépage V (traité ou non), un second cluster qui contient tous les cépages traités avec un SDP, avec un sous-groupe qui contient les deux cépages sensibles et la variété P (tous ont beaucoup réagi au traitement), et un troisième cluster qui regroupe les cépages en absence de traitement avec un sous-groupe qui réunit les résistants R et A, qui sont apparentés, et un second sous-groupe avec P et S qui ont aussi une parentèle commune.

Cette méthode et les gènes choisis (puces Néovigen ou Néostim) permettent de caractériser un cépage et son fonctionnement. Le clustering (Figure 5B) montre clairement que de nombreux gènes impliqués dans la défense et la protection sont surexprimés dans les variétés résistantes en absence de stimulation, et que la stimulation homogénéise une partie des réponses pour l'ensemble des cépages, avec les sensibles qui surexpriment plus les gènes de la voie de biosynthèse des polyphénols, et moins les gènes de protéines PR que les variétés résistantes. Ceci pouvant s'expliquer par les teneurs déjà élevées polyphénols dans les variétés résistantes. Notons que le traitement conduit aussi l'ensemble des cépages à moduler des gènes de la biosynthèse des lipides et du métabolisme carboné. Si, à ces analyses statistiques, nous ajoutons d'autres facteurs (analyse multifactorielle-AFM - Encadré 2), comme la sensibilité aux agents pathogènes des différentes variétés, l'analyse des combinaisons de données acquises (variables

### 3 – Phytostim : intégrer défense et métabolisme

**Le projet de phytostimulation** de la vigne Phytostim combine deux types de phytostimulants (stimulateurs de défenses des plantes SDP et biostimulants BS), en conditions contrôlées, sur des cépages de vigne sensibles et partiellement résistants à l'oïdium et au mildiou, pour développer de nouvelles méthodes de bio-protection utilisant l'immunité végétale comme levier. Ce projet explore et

étudie le compromis entre stimulateur des défenses et biostimulation, pour une protection efficace de cultivars sensibles et partiellement résistants à divers bioagresseurs. Le projet allie les compétences complémentaires des unités mixtes de recherche (UMR) SAVE (M.-F. Corio-Costet) et Agroécologie (M.C. Héloir) sur :

- le mode d'action multipathogènes des SDP ;
- le développement d'ou-

tils évaluant le statut de défense de la plante ;

- le métabolisme général de la vigne ;
- la gestion raisonnée de l'agrosystème viticole.

**À terme**, une lutte intégrant les SDP et les BS représenterait une voie innovante de biocontrôle pour agir sur les contraintes (biotiques et abiotiques) auxquelles sont soumis les différents cépages de vigne.

qualitatives/sensibilité et quantitatives/expression de gènes) (Figure 6), conduit à caractériser et à visualiser les différences entre les variétés sensibles et résistantes sur plusieurs dimensions. La première dimension explique 23,9% de la variabilité et discrimine les variétés par leur sensibilité aux deux agents pathogènes (les variétés sensibles à gauches, les résistantes à droite). Les trois dimensions majeures permettent d'expliquer 58,3% de la variabilité observée avec quelques modulations de gènes spécifiques dans les feuilles des variétés P, R et S, ou des variétés A et V (gènes PR, voie des auxines, glycolyse, cuticule, renforcement pariétal). Le fait de stimuler des variétés sensibles et résistantes conduit à une surexpression générale des gènes codant pour la biosynthèse des stilbènes et flavonoïdes dans tous les cépages, ainsi que ceux impliqués dans la voie de la biosynthèse de lipides et de la voie de la glycolyse. Certains gènes sont plus spécifiques des variétés comme ceux du renforcement de la cuticule, chez les cépages S, R et A, ou le transport du zinc chez les résistants P, S, R, et A.

#### Que conclure ?

Il est possible de caractériser le comportement d'un cépage sensible ou résistant, après une stimulation ou face à un stress biotique. La simple surexpression des gènes de défense, ou la production de polyphénols totaux seules ne suffisent pas à démontrer l'existence d'une protection. C'est la combinaison de l'expression de quelques gènes marqueurs, de modulations quantitatives et qualitatives de polyphénols qui permet de mieux comprendre la protection observée (induite ou non), et/ou la résistance variétale, et les mécanismes qui la sous-tendent. La comparaison de plantes sensibles, et résistantes en absence de stimulation montre que les variétés résistantes surexpriment

déjà plusieurs gènes de défense de manière intrinsèque, et que leur composition en polyphénols est différente qualitativement et quantitativement. Après stimulation, si quelques réponses sont communes à l'ensemble des cépages, plusieurs gènes ou groupes de gènes sont spécifiques aux variétés résistantes stimulées.

La stimulation des défenses conduit bien à une augmentation de la protection chez les variétés sensibles, très visibles pour le mildiou, moins visibles pour l'oïdium (délai trop court ici entre stimulation et inoculation). Pour les variétés résistantes, la stimulation améliore la protection contre le mildiou et l'oïdium, mais varie selon la variété résistante considérée. La différence entre résistance variétale et expression de cette dernière et la résistance induite par stimulation est faible, suggérant des mécanismes communs. Les variétés résistantes expriment différemment leur résistance, selon les traits de résistance qu'elles contiennent et leur niveau de protection. Utiliser des SDP en soutien de variétés sensibles ou résistantes est intéressant, mais, une stimulation doit être préventive et la protection apportée sera meilleure plusieurs jours après la stimulation. Une exploration plus large de la protection multi-pathogènes apportée après une stimulation est nécessaire : quid de la protection apportée contre le black-rot, des insectes ou les maladies de dépérissement ou la flavescence ? Le suivi de l'expression de gènes à haut débit permet de caractériser l'état global d'une plante *in natura* (ex. : avec ou sans symptômes d'esca ou de flavescence dorée), et de déterminer (en aveugle) si une plante est atteinte ou pas par la maladie, y compris celles qui sont asymptomatiques (projets FranceAgrimer Co-act, Mycovir, Toleda). Cette méthode et ces outils peuvent être utilisés aussi pour caractériser le mode d'action d'un produit

de biocontrôle, d'un biostimulant, ou d'un stress, voire l'effet d'un produit fongicide sur la plante...

Demain, la protection du vignoble sera multiple avec la possibilité d'exploiter la résistance variétale, ou des variétés partiellement résistantes associées à des phytostimulants, voire des combinaisons entre dose réduite de PPP et phytostimulants sur des cépages sensibles. L'ensemble doit permettre d'atteindre une meilleure protection, tout en limitant les intrants, pour mieux lutter contre des agents pathogènes à fort potentiel épidémique tels que l'oïdium et le mildiou. La protection viticole se doit d'être multipathogène, et devra aussi prendre en compte l'état physiologique de la plante et ses capacités à se défendre en présence de stress divers qui peuvent parfois améliorer ses capacités à se défendre. Plusieurs projets se développent sur ce sujet dans le cadre du RMT Bestim, dont le projet Phytostim (Encadré 3).

#### POUR EN SAVOIR PLUS

**CONTACT** : marie-france.corio-costet@inrae.fr  
**BIBLIOGRAPHIE** : voir notes.

(1) Guide technique : les cépages résistants aux maladies cryptogamiques, panorama européen, groupe ICV, 228 pages.

(2) Lazazzara et al., 2018. Downy mildew symptoms on grapevines can be reduced by volatile organic compounds of resistant genotypes. *Sci. Rep.* 8:1618, DOI:10.1038/s41598-018-19776-2.

(3) Calonnec A. et al., 2021. Defense responses of grapevine cultivars to powdery mildew: ontogenic resistance vs genetic resistance. *Plant Pathology*, n° 00, p. 1-18. <https://doi.org/10.1111/ppa.13404>.

(4) RMT Elicitra, 2018. Les stimulateurs de défense des plantes : panorama et solution d'avenir, Acta Éditions, Paris, 79 pages.

(5) Corio-Costet M. F. et al., 2013. BioMolChem, a tool to assess the defense status of grapevine after stimulation or not of cultivar or resistant genotypes: from genes to the field. *ISHS Acta horticulturarum*, n° 1009, p. 53-60.

(6) Dufour M.C. et al., 2016. High-throughput gene-expression quantification of grapevine defense responses in the field using fluidigm microfluidics dynamic arrays. *BMC genomics*, n° 17, p. 957. DOI 10.1186/s12864-016-3304-z.

(7) Bellée A. et al., 2018. Comparison of the impact of two molecules on plant defense and efficacy against *Botrytis cinerea* in the vineyard : A plant defense inducer (benzothiadiazole) and a fungicide (pyrimethanil). *J. Agric. Food Chem.*, n° 66 (13), p. 3338-3350. DOI : 10.1021/acs.jafc.7b05725.

(8) Bodin E. et al., 2020. Grapevine stimulation: a multidisciplinary approach to investigate the effects of biostimulants and a plant defense stimulator. *J. Agric. Food Chem.*, n° 68, 51, p. 15085-15096. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05849>

(9) Burdzziej A. et al., 2021. Three types of elicitors induce grapevine resistance against downy mildew via common and specific immune responses. *J. Agric. Food Chem.*, n° 69 :6, p. 1781-1795. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06103>