

**AFPP – CINQUIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE
SUR LES MÉTHODES ALTERNATIVES DE PROTECTION DES PLANTES
LILLE – 11 AU 13 MARS 2015**

**DEFISTIM- Projet Collaboratif-FUI
ACCELERER, OPTIMISER ET DEVELOPPER LA MISE EN MARCHÉ DES
STIMULATEURS DES DEFENSES DES PLANTES (SDP), AVEC L'APPUI DES OUTILS
D'AIDE A LA DECISION (OAD)**

BONNEAU C⁽¹⁾, AVELINE N⁽²⁾, AYRAL J-L⁽³⁾, BAILLIEUL F⁽⁴⁾,
BRISSET M-N⁽⁵⁾, CHAUVIN J-E⁽⁶⁾, CORIO- COSTET M-F⁽⁷⁾, DAIRE X⁽⁸⁾, GAUCHER D⁽⁹⁾, LEHINGRAT Y⁽¹⁰⁾,
MERY-BERNARDON A⁽¹¹⁾, MONCOMBLE D⁽¹²⁾, PELLE R⁽⁶⁾, SAUBEAU G⁽¹³⁾, TAILLIEZ-LEFEBVRE D⁽¹⁴⁾,
THOMAS G⁽¹⁵⁾, TURNER M⁽¹⁶⁾, VAL F⁽¹⁷⁾, VERJUX N⁽⁸⁾,

⁽¹⁾ VEGEPOLYS, 26 rue Dixmeras, 49066 Angers Cedex 01, France, caroline.bonneau@vegepolys.eu; ⁽²⁾ IFV Pôle Bordeaux-Aquitaine, 39 rue Michel Montaigne 33290 Blanquefort ; ⁽³⁾ Force A, Université Paris Sud, Bât 503, 91893 Orsay cedex ; ⁽⁴⁾ Université de Reims Champagne-Ardenne, UR Vignes et Vins de Champagne, Moulin de la Housse, BP1039, 51687 Reims Cedex2 ; ⁽⁵⁾ Institut de Recherche en Horticulture et Semences, (INRA, Université d'Angers, ACO) 42 rue Georges Morel, BP 60057 49071 Beaucozé cedex; ⁽⁶⁾ Institut de Génétique, Environnement et protection des Plantes, Keraiber, 29260 Ploudaniel ; ⁽⁷⁾ INRA, UMR Santé et Agroécologie du Vignoble (1065), 71 rue Edouard Bourloux, CS 20032, 33882 Villenave d'Ornon ⁽⁸⁾ UMR 1347 Agroécologie, AgroSup-INRA-uB, 17 rue Sully BP 86510 21065 Dijon cedex ; ⁽⁹⁾ ARVALIS-Institut du végétal F-91720 Boigneville ; ⁽¹⁰⁾ FN3PT, 43-45 rue de Naples, 75008 Paris ; ⁽¹¹⁾ Goëmar Parc technopolitain Atalante, CS 41908 Saint Jouan des Guérets, 35419 Saint Malo ; ⁽¹²⁾ CIVC 5 rue H Martin, 51200 Epernay ; ⁽¹⁴⁾ In Vivo AgroSolutions, 83 av de la grande armée, 75116 Paris, ⁽¹⁵⁾ Syngenta 1 av des Prés, 78286 Guyancourt Cedex; ⁽¹⁶⁾ VEGENOV, Penn ar Prat, 29250 St Pol de Léon ; ⁽¹³⁾ INRA, UMR1349 IGEPP, F-35653 Le Rheu-Cedex ; ⁽¹⁷⁾ Agrocampus Ouest, UMR 1349 IGEPP, 35042 Rennes Cedex.

RESUME

Le projet collaboratif DEFISTIM a eu pour objectif de définir les conditions optimales d'efficacité des Stimulateurs de Défense des Plantes (SDP), sur trois cultures « modèles », le pommier, la vigne et la pomme de terre. Il a permis i) d'identifier les SDP capable de protéger les cultures contre différentes maladies aux conséquences économiques importantes en terme de pertes ou d'emploi de produits de lutte conventionnels, ii) de contribuer au développement d'outils aide à la décision (OAD) destinés à améliorer le positionnement des SDP et iii) d'acquérir des connaissances génériques pour cerner les limites des SDP et proposer une stratégie d'usage. Concernant les OAD, différentes pistes innovantes ont été prospectées au niveau transcriptionnel, métabolomique et optique, qui ont abouti à l'identification de marqueurs d'induction des défenses par les SDP. Quant aux limites des SDP, des connaissances ont été acquises sur l'influence de facteurs agro-environnementaux sur l'efficacité des SDPs au laboratoire et sur le terrain. Les résultats principaux non confidentiels sont présentés ci-après.

Mots-clés : SDP, OAD, efficacité, protection, stimulateur

**DEFISTIM- Collaborative-FUI
SPEED UP, OPTIMIZE AND DEVELOP THE MARKET USE OF PLANT DEFENSE
ELICITORS, WITH THE USE OF DECISION SUPPORT SYSTEM**

ABSTRACT

The DEFISTIM project aimed to define the optimal conditions for the use of Plant Defense Elicitors, on three “model” plants, apple, grapevine and potato. The DEFISTIM project allowed to i) identify

the SDP with protection efficiency against different diseases with major economic losses or chemical use, ii) contribute to the development of Decision Support System to help in SDP positioning in field, iii) acquire generic knowledges on agro-environmental parameters that limit the use of elicitors and propose a strategy fo usage.

In term of DecisionSupport System, several innovative tools were tested at the transcriptionnal, metabolomic and optic level and allowed the identification of markers for defense induction by SDP. Concerning the limit of SDP, better knowledges were acquired on agro-environmental effects on elicitor efficiency both in controlled conditions and field. Main non confidential results are presented below.

Keywords: SDP, Decision-making tools, efficiency, protection, elicitor

INTRODUCTION

Les Stimulateurs de Défense Naturelle (SDP) constituent une des alternatives possibles à l'usage des pesticides, et donc une des réponses aux objectifs du plan Ecophyto. En France, le marché de la protection des cultures s'élève à 2 milliards d'euros environ. Le développement des produits de bio-contrôle, dont font partie les SDP, est un enjeu clé dans un contexte de réduction de l'utilisation des pesticides conventionnels. Ce marché ne représente aujourd'hui que 5% du marché total des pesticides conventionnels, soit 100 m€, mais il est en croissance entre 15 et 20% annuellement.

Le développement des SDP, tout comme leur emploi sur le terrain, reste cependant anecdotique souvent par manque de fiabilité et de reproductibilité dans l'efficacité de protection finale obtenue entre le laboratoire et le terrain. De meilleures connaissances sur l'influence de paramètres agro-environnementaux, génétiques ou physiologiques pouvant interagir avec l'efficacité des SDP sont nécessaires.

Afin de se donner les moyens d'optimiser l'efficacité de protection des plantes par les SDP, un consortium s'est formé autour du projet DEFISTIM avec trois objectifs:

1. **Identifier les SDP capables de protéger les cultures** contre différentes maladies aux conséquences économiques importantes en terme de pertes ou d'emploi de produits de lutte conventionnels.
2. **Développer des Outils d'Aide à la Décision (OAD) innovants afin d'optimiser le positionnement des SDP et sécuriser leurs efficacités**, à partir de technologies transcriptionnelles, métabolomiques et optiques temps réel.
3. **Acquérir des connaissances génériques sur leurs efficacités** en lien avec la plante et son agro-environnement pour : **cerner les limites des SDP** et définir les conditions optimales d'efficacité des SDP sur le terrain.

Le projet DEFISTIM se focalise sur **trois plantes « modèles », le pommier, la vigne et la pomme de terre, cultures qui présentent des IFT (indice de fréquence de traitement) élevés**. Ces trois cultures représentent trois filières du végétal spécialisé (arboriculture fruitière, viticulture, culture légumière) pour lesquelles le contexte de la protection phytosanitaire est de plus en plus difficile.

Le projet DEFISTIM a permis d'acquérir des connaissances génériques pour cerner les conditions optimales d'efficacité des SDP et a contribué au développement d'OAD, l'ensemble permettant d'aider au positionnement des SDP et de proposer une stratégie d'usage.

MATERIEL ET MÉTHODES

Tests d'efficacité au laboratoire

Pommier: les tests sont conduits en serre en conditions contrôlées sur des semis de pommier de la variété Golden delicious, au stade 3 à 6 feuilles. Le traitement s'effectue par pulvérisation jusqu'à ruissellement, 4 jours avant l'inoculation avec une souche de *Venturia inaequalis*. La notation s'effectue 3 semaines après inoculation.

Vigne : Mildiou : Les tests sont réalisés en conditions contrôlées sur disques foliaires de plants de vigne ou sur boutures foliaires. L'inoculation avec *Plasmopara viticola* a lieu 24h ou 48h après traitement des plants. Oïdium : les tests sont réalisés sur disques de feuilles qui sont traités 24 h avant inoculation avec différentes souches d'*Erysiphe necator*. La lecture est réalisée 12 jours après inoculation (Dufour et Corio-Costet, 2013). Pourriture grise : Les traitements sont réalisés sur pieds au vignoble. Les grappes sont récoltées 4 jours après traitement et les baies sont inoculées artificiellement par vaporisation de spores de *Botrytis cinerea*. Le comptage des baies développant des symptômes est réalisé de 3 à 12 jours après inoculation.

Pomme de Terre : les tests sont réalisés en conditions contrôlées sur des plants de la variété Bintje au stade 4 feuilles. Le traitement s'effectue par pulvérisation jusqu'à ruissellement, 4 jours avant l'inoculation avec une souche de *Phytophthora infestans*. La notation est réalisée 7 jours après inoculation.

OAD transcriptionnels

Pommier : La modulation de l'expression relative de 28 gènes de défense du pommier a été analysée par l'outil qPFD[®], développé et breveté par l'INRA (Brisset et Dugé de Bernonville, 2010). Des semis de pommier sont pulvérisés avec le traitement SDP puis, 24h après, avec une application de peroxyde d'hydrogène pour imiter une attaque de bioagresseurs. Les prélèvements de disques foliaires se font à J0, puis J1, J2 et J3 après traitement.

Pomme de terre : L'outil qPCR final comprend une cinquantaine de gènes recouvrant les principales voies métaboliques de défense (SA, JA, Ethylène, modifications pariétales, polyamines, sequiterpénoïdes, protéines PR...) et a été développé à partir des connaissances sur la qPFD[®] Pommier par G Saubeau (2014). Les traitements se font sur des plants 1 semaine après bouturage et des prélèvements sont effectués à J-1, J0, J+1, J+3 et J+6.

Vigne: A partir de listes de gènes dessinés et mises au point à l'UMR Save, Bordeaux hors FUI Defistim (puce Biomolchem (Dufour *et al.*, 2013) : 20 gènes (2008), puce q-PFD (2011) : 38 gènes et puce Neovigen96 : 96 gènes (2011), un outil global de 20 à 96 gènes a été utilisé pour analyser par q-RT-PCR, après extraction d'ARNm et transcription en cDNA les gènes exprimés dans les feuilles provenant des essais terrain.

OAD optiques

Pommier :

Les tests ont été conduits avec des Multiplex optiques 330 et 375 pour mesurer différents paramètres potentiellement marqueurs d'induction des défenses (signaux dans l'UV, le visible, indice de fluorescence ..). Différents paramètres, tels que le paramètre ANTH_RG, indicateur d'anthocyane, le BGF-UV, indice de la fluorescence, ont été mesurés. Ces essais ont été réalisés soit en conditions contrôlées soit sur le terrain.

Test d'efficacité sur le terrain

Pomme de Terre : Les essais sont réalisés en conditions semi-contrôlées avec la variété féculière sensible Kaptah-Vandel en micro-parcelles de 4 rangs x 10m dans différentes localisations (Beauce, Champagne). Le dispositif expérimental est constitué de 4 répétitions réparties en alpha-plan avec une installation de brumisation afin de créer des conditions favorables au mildiou. Entre deux parcelles, il y a 2 rangs non plantés au milieu duquel 1 rang planté sert de rang contaminateur, inoculé 3 à 4 semaines après levée avec une souche de *Phytophthora infestans*. Les contrôles sont réalisés en

végétation sur l'évolution 1 à 2 fois par semaine de la destruction du feuillage par la maladie et après la récolte sur le taux de contamination des tubercules par le mildiou.

RESULTATS

1- EVALUATION DES SDP EN CONDITIONS CONTROLÉES

Des essais d'efficacité de protection ont été réalisés en conditions contrôlées sur les trois cultures, vigne/pommier/pomme de terre. Les résultats avec les SDP les plus prometteurs sont présentés ci-après.

Tavelure/Pommier

Plusieurs essais indépendants ont montré une efficacité de protection significative du SDP B et du SDP C sur l'incidence relative de la tavelure sur pommier en conditions contrôlées, contrairement au SDP A. Aucune propriété bactéricide ou fongicide n'a été révélée excepté pour le SDP B (données non présentées). Le SDP C a montré également une efficacité de protection significative contre le feu bactérien et le puceron cendré (données non présentées).

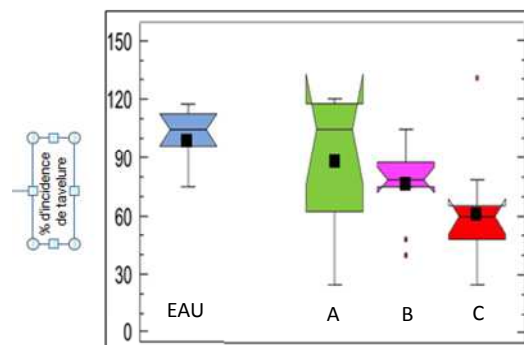


Figure 1: Effet des SDP candidats sur l'incidence relative (%) de la tavelure sur pommier en conditions contrôlées. Effect of candidate elicitors on relative disease incidence (%) of apple scab (IRHS).

Mildiou/Pomme de terre

Plusieurs tests d'efficacité ont été réalisés et montrent une protection d'environ 50 % pour le SDP B et de 10% pour le SDP A. Le SDP B montre également un effet direct sur le pathogène en boîte de Petri avec un effet négatif sur la croissance de spores.

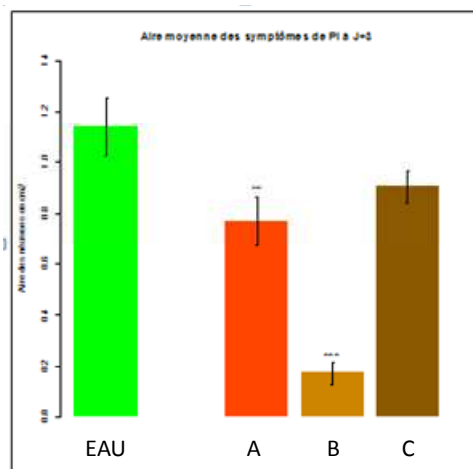


Figure 2 : Effet des SDP candidats sur l'aire moyenne des symptômes de *Phytophthora infestans* sur pomme de terre en conditions contrôlées. Effect of candidate elicitors on late blight disease surface area on potato leaves in controlled conditions (VEGENOV).

Mildiou Oïdium et Botrytis/Vigne

L'étude de l'efficacité des SDP candidats sur vigne montre des hétérogénéités de résultats, en particulier en fonction du cépage considéré. Il ressort cependant des effets de protection des SDP A, B et C, sur le mildiou de la vigne (boutures) et l'oïdium (données non présentées) et du SDP C sur baies artificiellement inoculées avec *Botrytis* (figure 3).

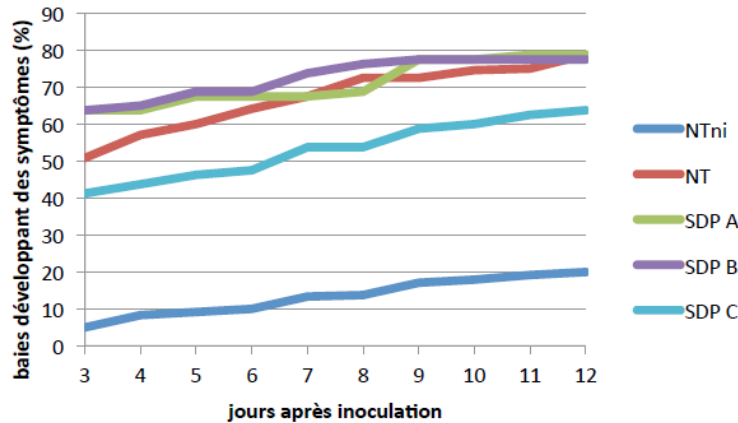


Figure 3 : Suivi des symptômes de baies du vignoble inoculées artificiellement avec *Botrytis cinerea* après prétraitement avec les SDP candidats. NTni : baies non prétraitées et non inoculées, NT : baies non prétraitées et artificiellement inoculées. Pour chaque modalité, 80 baies ont été comptabilisées. Symptom notations on grapes from vineyard, that were artificially inoculated with *Botrytis cinerea* after a SDP treatment. NTni : mock- treated and not inoculated grapes. NT : treated and inoculated grapes. (URCA).

2- DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION (OAD)

2.1 OAD Transcriptionnels

Pommier:

L'analyse transcriptionnelle des gènes de défense avec l'outil qPFD® s'est avérée utile en conditions contrôlées et sur le terrain pour révéler les effets des SDP.

Les résultats en conditions contrôlées indiquent que les **SDP A, B, C** ont un potentiel de stimulation d'une partie des 28 gènes de défense étudiés. Ces SDP induisent globalement les mêmes voies de défense comme la voie des protéines PR ou de l'acide salicylique. Sur le terrain, des différences d'expression de gènes sont observées, mais la variabilité observée ne permet pas d'envisager cet OAD en routine dans les vergers.

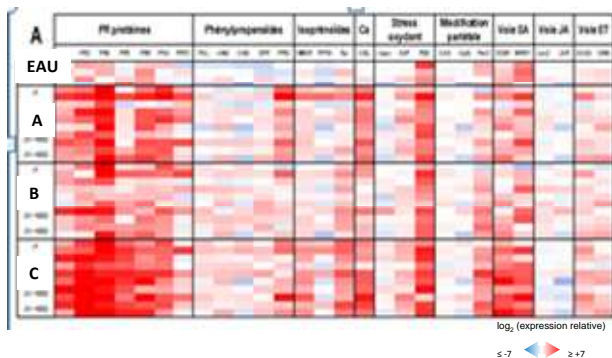


Figure 4 : Analyse de l'expression relative de 28 gènes de la qPFD® dans des feuilles de semis de pommier en conditions contrôlées. Carte de densité des log2ratio par rapport aux témoins eau à chaque temps. Analysis of the relative expression of 28 genes with the qPFD® tool in leaves from apple seedlings in controlled conditions (IRHS).

Pomme de terre :

Un outil transcriptomique composé de 50 gènes a été mis en place dans le cadre de ce projet (Saubeau, 2014). L'outil qPCR a été mis au point à partir de gènes de défense choisis par une approche « *a priori* » en se basant, en partie, sur la qPFD® pommier. Des gènes spécifiques aux Solanacées décrits dans la bibliographie ont également été ajoutés. Les couples d'amorces ont été dessinés sur Primer3Plus à partir des numéros d'accès pomme de terre. Quelques séquences ont également été trouvées sur le site TIGR Plant Transcripts Assemblies. La spécificité et l'efficacité des amorces ont été testées par qPCR pour valider les couples d'amorces des gènes de défense ciblés. L'analyse de l'induction de transcrits après traitement avec les SDP A et B indique que le produit A induit plus fortement les gènes de défense que le SDP B, et notamment induit les voies des protéines PR et du jasmonate.

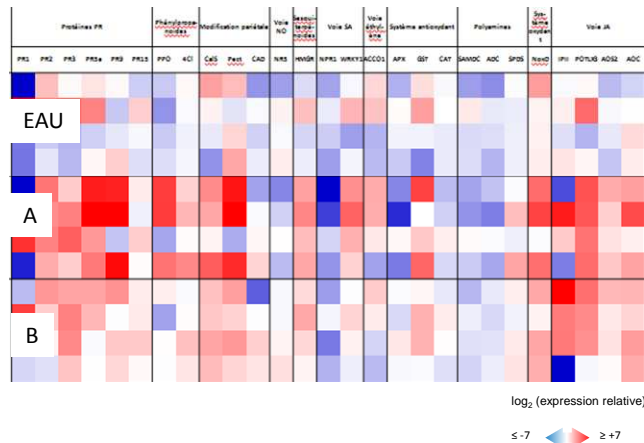


Figure 5 : Analyse de l'expression relative des 50 gènes de défense de l'outil qPCR pomme de terre sur des feuilles de pomme de terre en conditions contrôlées. Analysis of the relative expression of 50 defense genes of the qPCR potato tool on potato leaves in controlled conditions (IGEPP).

Vigne :

L'outil transcriptionnel de 20 à 96 gènes a été utilisé pour étudier l'expression des gènes après application des SDP A, B et C, sur différents cépages.

Les résultats indiquent que les profils d'expression des gènes de défense varient en fonction des cépages. De plus, il est observé que les SDP candidats n'induisent pas tous les mêmes voies de défenses. Le SDP A induit les voies de l'éthylène et de l'acide salicylique. Le SDP B induit les voies du jasmonate et de l'acide salicylique. Le SDP C induit les voies de l'acide salicylique et de l'éthylène.

2.2 OAP Optiques

L'utilisation de Multiplex optiques 330 et 375 sur pommier a permis de mettre en évidence que le paramètre ANTH-RG peut être dans certains cas un marqueur physiologique au laboratoire et au verger, et un marqueur d'une réponse aux SDP au laboratoire, et notamment du SDP C.

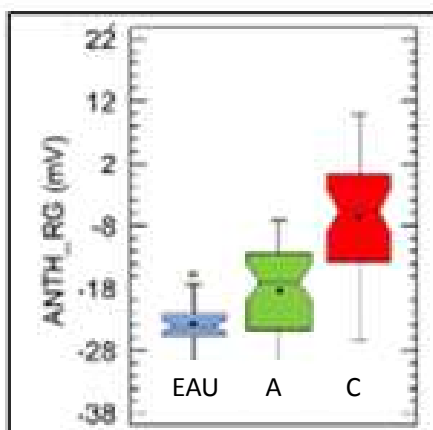


Figure 6 : Distribution du paramètre ANTH-RG avec les SDP A et C. Distribution of the ANTH-RG parameter with the 375 multiplex in controlled conditions in response to product A or C treatment (IRHS).

En conclusion, le développement d’OAD comme marqueurs d’induction des défenses par les SDP candidats a permis d’identifier selon les cultures des outils fonctionnant en conditions contrôlées et sur le terrain.

Le tableau ci-dessous résume l’ensemble des champ d’actions du projet, dont certains ne sont pas présentés dans ce résumé.

OAD	Pommier		Pomme de terre		Vigne	
	Conditions contrôlées	Terrain	Conditions contrôlées	Terrain	Conditions contrôlées	Terrain
OAD métabolique	X	-			X	-
OAD multiplex	X	X	-	-	X	-
OAD transcriptionnel « gènes de défense »	X	X	X	X	X	X
OAD protéique « immunologique »	X	X			-	-

Tableau 1 : Outils d’aide à la décision développés dans le cadre du projet DEFISTIM pour chacune des 3 cultures. Les OAD ont été testés en conditions contrôlées et sur le terrain, et ont permis (X) ou non (-) d’identifier un ou des marqueur(s) d’induction des défenses par un SDP. Les cases grisées correspondent aux développements non prévus dans le projet.

3-CONNAISSANCES GENERIQUES SUR LES SDP ET STRATEGIE D’EMPLOI DES SDP SUR LE TERRAIN

Des études de l’effet de stress abiotiques, de l’heure du traitement, du délai entre le traitement et l’attaque du pathogène, ainsi que l’effet génétique ont été étudiées dans le cadre du projet.

Les résultats indiquent que certains stress abiotiques peuvent réduire l’efficacité des SDP, tel que le stress thermique. D’autres résultats ont montré qu’il existe un lien entre le génotype et l’efficacité des SDP (données non présentées).

Par ailleurs, en appui des OAD développés dans le projet, des essais ont été menés sur le terrain afin d’identifier de nouvelles stratégies d’emploi des SDP en testant au sein d’un programme de traitement leur association avec des additifs, d’autres SDP ou avec des pesticides. L’objectif était de proposer aux expérimentateurs de terrain non plus un SDP à une dose précise, mais un programme de traitement intégrant l’emploi de SDP en association.

Pomme de terre :

Au cours de trois essais réalisés au champ, les résultats indiquent qu’une association du SDP B avec un traitement fongicide à demi-dose permet d’améliorer le niveau de protection. Ces résultats ont été répétés sur 3 années successives 2001, 2012 et 2013 et dans différentes régions de production. En particulier, les résultats indiquent qu’une association du SDP B avec un traitement fongicide à demi-dose permet d’obtenir un niveau de protection équivalent (2011 et 2012) à celui d’un traitement avec un fongicide pleine dose ou intermédiaire (2013, figure 7) entre les 2 modalités fongicides dose N et N/2. Cette efficacité varie en fonction de l’intensité de la pression de maladie dans les essais (conditions très sévères en 2013 avec inoculation et brumisation). D’autres équilibres entre fongicides et SDP ont été évalués et pourraient servir d’adaptation en fonction de la pression de maladie : la dose de fongicide serait augmentée en cas de très forte pression de mildiou. Cela permet d’envisager des préconisations d’associations de SDP avec des traitements fongicides à dose réduite.

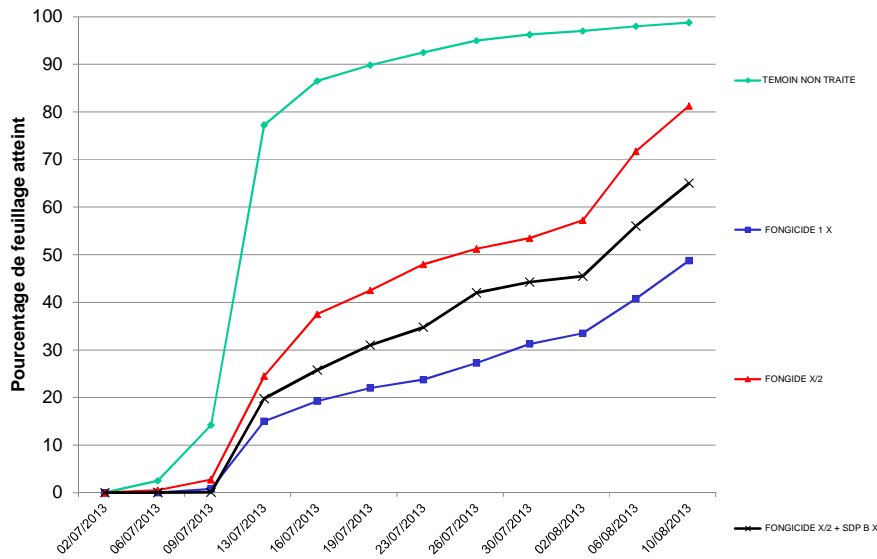


Figure 7 : Cinétique de destruction du feuillage (en pourcentage de feuillage atteint) par le mildiou de la pomme de terre au terrain avec des traitements conventionnels à pleine dose ou demi-dose sur l'essai 2013 en association avec le SDP B. Kinetic of potato haulm destruction with potato late blight (in percentage of symptomatic leaves) in inoculated infestation conditions (2013) with full or half doses of fungicide associated with SDP B (Arvalis et FN3PT).

Vigne : L'étude de l'efficacité des SDP candidats sur vigne a été testé au vignoble sur des parcelles expérimentales en infestation naturelle avec Botrytis. Sur l'ensemble des combinaisons testées, il ressort que l'association des SDP B et C ou A et C, améliore nettement l'efficacité de protection du SDP A ou B.

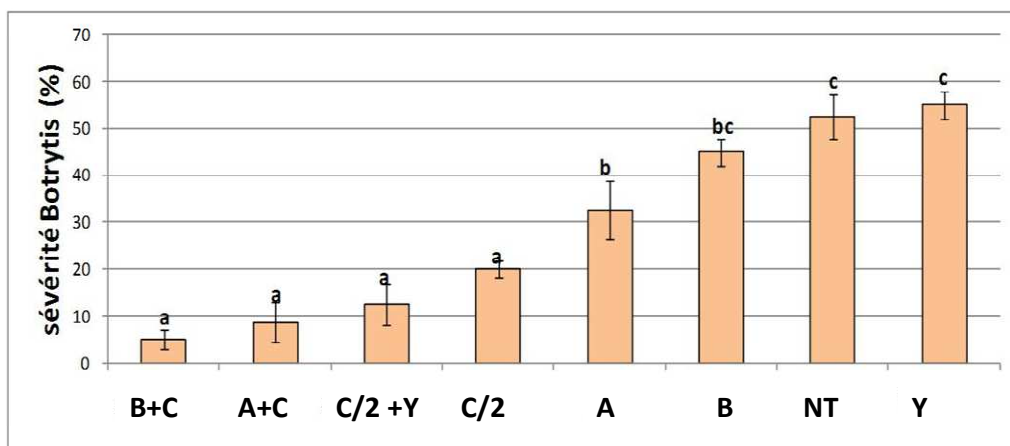


Figure 8 : Sévérité des symptômes de pourriture grise sur une parcelle d'essai à Bordeaux (conditions naturelles) après traitement avec les produits A, B, C seul, à demi dose (C/2) ou associé. NT= contrôle non traité, Y= fongicide non efficace. Symptom severity of grey mold in a experimental plot in Bordeaux

(natural conditions) after treatment with SDP A, B and C, or half dose (C/2) or associated together. NT= control, Y= fungicide.(UMR SAVE)

CONCLUSION

Au cours de ce projet, l'évaluation de plusieurs SDP a été réalisée en conditions contrôlées et sur le terrain avec différentes maladies cryptogamiques. Les résultats ont permis de mettre en évidence des niveaux de protection significatifs en conditions contrôlées pour certains de ces SDP, comme **le SDP C en protection pour la tavelure** du pommier, ou la **pourriture grise de la vigne**, ou les **SDP B en protection contre le mildiou de la pomme de terre**.

En parallèle, des outils d'aide à la décision et au positionnement des SDP ont été développés ou testés au cours du projet DEFISTIM. Dans ce résumé, sont présentés les OAD transcriptionnels, qui révèlent des **marqueurs spécifiques d'induction des défenses** par les SDP, et en particulier par les SDP C chez le pommier, et SDP A chez la pomme de terre. D'autres outils optiques ont été testés, et le Multiplex 375 a donné des résultats prometteurs sur pommier en conditions contrôlées avec un paramètre ANH-RG qui permet de marquer les plantes induites par le SDP C. Cependant, dans ce projet, les résultats n'ont pas été consolidés sur le terrain. D'autres outils métabolomiques ou immunologiques, non présentés ici, ont permis d'identifier des marqueurs de défenses, et ont davantage des applications plus facilement transposable en routine sur le terrain.

Par ailleurs, des connaissances génériques sur les paramètres affectant l'efficacité des SDP (stress abiotique, période de traitement, génotype) ont été acquises et sont maintenant disponibles pour ces trois cultures.

Enfin, la stratégie d'usage étudiée au cours de ce projet et présentée ici indique dans le cas de la pomme de terre que le SDP B peut permettre une réduction de la dose du traitement fongicide classique. De la même façon, les résultats au vignoble indiquent des effets additifs entre SDP.

Ces résultats ont permis d'établir un bilan économique et technique pour proposer une stratégie d'emploi

DISCUSSION

L'intérêt des SDP en général repose sur le fait qu'ils peuvent être utilisés en substitution totale ou partielle d'un programme de lutte classique et qu'ils présentent des effets souvent plus larges que la cible pour laquelle ils ont été découverts. Nous montrons en effet ici dans cette étude, que certains SDP, comme le SDP C, ont un spectre large d'action en termes de cible. Cependant, cette étude montre que les SDP peuvent être adaptés plus spécifiquement à une ou des culture(s).

Aujourd'hui, la substitution totale est relativement rare du fait des fluctuations de réponses aux SDP au regard des conditions environnementales. Nous montrons ici dans cette étude, que certains stress abiotiques peuvent diminuer l'efficacité des SDP. De nombreuses interrogations persistent et d'autres recherches seront nécessaires pour mieux cadrer leur positionnement.

Les OAD développés dans ce projet ont permis d'identifier plusieurs marqueurs d'induction des défenses, au niveau transcriptionnel, métabolomique, optique, et immunologique. **Les OAD transcriptionnels** s'avèrent pour les trois cultures des **outils efficaces et fiables** pour identifier l'effet « **stimulateur** » des gènes de défense *in planta*, en conditions contrôlées ou sur le terrain, et permettent d'établir un lien significatif avec la protection *in planta*. Cependant ces derniers semblent difficilement utilisables en routine sur le terrain. Des OAD plus adaptés en terme de prélèvement, traitement et délai de réponse, tels que les **OAD immunologiques**, semblent plus adaptés au terrain et les recherches dans ce domaine se poursuivent afin **d'aider au positionnement des SDP sur le terrain**.

La **substitution partielle** des SDP pourrait s'avérer intéressante d'un point de vue environnemental lorsqu'elle s'adresse à des cultures telles que la vigne, la pomme de terre ou l'arboriculture qui concernent des grandes surfaces de culture, un nombre de traitements élevés, avec des produits de contact utilisés seuls ou en mélange (cuivre, mancozèbe, folpel) pour lesquels il y a une volonté de réduire les quantités annuelles épandues.

Dans ce contexte toute part de substitution se traduit par des effets importants sur les tonnages épandus. Nous pouvons à titre d'exemple prendre le cas du cuivre utilisé sous forme de bouillie bordelaise ou toute autre forme, sur toutes les vignes de France. Environ 3800 t sont épandues en moyenne par an, une réduction de 25% si utilisé en association avec un SDP efficace en protection éviterait un épandage de 950 t annuelles.

REMERCIEMENTS

Fonds Unique Interministériel, Conseils Régionaux des Pays de la Loire, Bretagne, Champagne-Ardenne, et Languedoc Roussillon qui ont permis de financer ces travaux.

BIBLIOGRAPHIE

Brisset M-N et T Dugé de Bernonville, 2010 , INRA patent WO 2011161388 A1W.

Marolleau B, Staub J, Barrière Q, Indiana A, Gravouil C, Chartier R, Heintz C, Devaux M, Tharaud M, Paulin J-P, Dugé de Bernonville T et Brisset M-N. 2013. La qPFD, un outil de criblage des SDP *alias* stimulateurs de défense des plantes. *Phytoma*, 664, 42-45.

Dufour M-C et Corio-Costet M-F 2013. Variability in the sensitivity of biotrophic grapevine pathogens (*Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola*) to acibenzolar-S methyl and two phosphonates. *Eur. J Plant Pathol.* 136(2) : 247-259.

Dufour M-C, Lambert C, Bouscalt J, Mérillon J-M et Corio-Costet M-F. 2013. Benzothiadiazole-primed defense responses and enhanced differential expression of defense genes in *Vitis vinifera* infected with biotrophic pathogens (*Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola*). *Plant Pathology* - 62(2): 370-382

Gaucher D, Martin A, Jaunatre V, Beauvallet G, (2011), Evaluation de traitements alternatifs valorisant les stimulateurs de défense des plantes contre le mildiou de la pomme de terre ; in recueil de communications, AFPP – QUATRIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MÉTHODES ALTERNATIVES EN PROTECTION DES CULTURES ; LILLE – 8, 9 et 10 MARS 2011, 10p.

Saubeau G. 2014. Thèse. Implication de la PAMP triggered Immunity dans la résistance quantitative de la pomme de terre à *Phytophthora infestans* ? "