

Conception et transfert de systèmes décisionnels pour la réduction des traitements en viticulture : le projet SyDÉRÉT

Delière L.¹, Cartolaro P.¹, Goutouly J.P.², Barbier J.M.³, Bonicel L.³, Forget D.⁴, P. Leroy P.⁵, Naud O.⁶, Alonso Ugaglia A.⁷, Del'homme B.⁷, Davy A.⁸, Davidou L.⁹, Guilbault P.⁹, Guisset M.¹⁰, Guillois F.¹¹

¹ INRA, ISVV, UMR1065 Santé et Agroécologie du Vignoble, F-33883 Villenave d'Ornon, France

² *INRA, ISVV, UMR1287 EGFV, F-33883 Villenave d'Ornon, France*

³ INRA, UMR Innovation, F-34060 Montpellier cedex 01, France

⁴ INRA, UE1086 Unité Expérimentale Viticole, F-33883 Villenave d'Ornon, France

⁵ INRA, UR1303 ALISS, F-94205 Ivry-sur-Seine, France

⁶ Irstea, UMR ITAP, F-34196 Montpellier cedex 5, France

⁷ Univ. Bordeaux, ISVV, USC 1320 INRA GAIA, F-33170 Gradignan, France

⁸ Institut Français de la Vigne et du Vin, F-33295 Blanquefort cedex, France

⁹ Chambre d'Agriculture de la Gironde, F-33295 Blanquefort cedex, France

¹⁰ Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales, F-66025 Perpignan cedex, France

¹¹ Chambre d'Agriculture de l'Aude, F- 11878 Carcassonne cedex 9, France

Correspondance : laurent.deliere@bordeaux.inra.fr

Résumé

La maîtrise du mildiou et de l'oïdium de la vigne repose majoritairement sur l'utilisation systématique de fongicides. Une des voies pour limiter quantitativement le recours aux fongicides est de proposer des stratégies de décisions explicites et innovantes pour des traitements moins systématiques et appliqués aux moments les plus opportuns. Dans le cadre du projet SyDÉRÉT, un processus opérationnel de décision nommé Mildium® a été conçu et testé à l'échelle parcellaire durant plusieurs années dans le vignoble français. Son application permet une réduction de 30% à 50% de l'indice de fréquence de traitement contre ces deux maladies sans altérer les performances de la récolte dans plus de 90% des situations et sans entraîner un surcoût de mise en œuvre. Des enquêtes menées auprès des viticulteurs au cours de ce projet montrent cependant que des freins techniques et économiques à l'adoption de ce type de processus existent dans les exploitations et que la diffusion de ces pratiques nécessite un accompagnement étroit des viticulteurs. Un travail de modélisation bioéconomique conduit durant ce projet, permet d'analyser l'impact potentiel en termes de risques de perte de récolte de stratégies de protection contre ces deux bio-agresseurs.

Mots-clés : mildiou, oïdium, processus de décision, innovation, modèle bioéconomique.

Abstract : Design and transfer of decision-making systems for reducing treatment in viticulture : the SyDeReT project

In most cases, the protection of grapevine against powdery and downy mildews relies on systematic usage of fungicides. One mean to limit the amount of fungicides used is to design innovative and explicit decision strategies for treatments applied less systematically and at most opportune times. Within the SyDÉRÉT project, a decision workflow named Mildium® has been designed and implemented at the plot scale during several years in French vineyards. Mildium® made it possible to reduce by 30 to 50% the Treatment Frequency Index for these two diseases without altering, in more than 90% of the cases, the crop protection performance at harvest and without augmenting costs. Interviews of growers which were

conducted during this project showed that technical and economical factors may hinder the adoption process for such decision tools and that technical support to growers is needed. A bio-economic model was developed during this project in order to investigate potential impacts of crop protection strategies against both diseases on crop and yield damage risks.

Keywords: downy mildew, powdery mildew, decision workflow, innovation, bioeconomic model

Introduction

L'agrosystème vigne est confronté à plusieurs bio-agresseurs susceptibles de pouvoir détruire la récolte en totalité. Ces bio-agresseurs sont aujourd'hui majoritairement contrôlés par l'utilisation de produits phytosanitaires, notamment par des fongicides. Ainsi la pression phytosanitaire se traduit par un Indice de Fréquence de Traitement (IFT) moyen français de 13,6 (Mézières *et al.*, 2009). Parmi ces traitements, plus de 80% sont des fongicides destinés à lutter contre le mildiou et l'oïdium de la vigne. Ces valeurs moyennes masquent néanmoins une très forte variabilité des pratiques. La variabilité entre régions de production s'explique notamment et *a priori* par des différences climatiques, de terroir, d'encépagement. Cependant, on l'observe également au sein de zones géographiques climatiquement homogènes, et ceci malgré la mise à disposition d'outils permettant d'aider les viticulteurs à évaluer l'opportunité d'une intervention (modèles bioclimatiques de prévision des risques, données issues de réseaux d'observation,...). On peut donc faire l'hypothèse qu'il y a d'autres causes à cette variabilité dans une région viticole. Des facteurs comme l'aversion aux risques des producteurs et les contraintes d'organisation du travail influencent fortement les pratiques de protection et on observe souvent des traitements relativement systématiques pour ces deux bio-agresseurs. On peut aussi considérer, et c'est l'hypothèse que nous faisons, qu'il existe une marge de manœuvre dans la gestion des traitements phytosanitaires afin d'en réduire le nombre.

Ce projet est centré sur le concept de Processus Opérationnel de Décision (POD) qui constitue une stratégie de traitements dont la logique et le déroulement temporel tout au long de la saison sont explicites. L'objectif est de construire des prototypes de tels processus de décision permettant de limiter significativement le recours à l'usage de produits phytosanitaires et d'évaluer leurs performances au vignoble. La démarche suit un schéma dynamique d'élaboration et de validation agro-économique selon les étapes suivantes.

1. **Elaboration conceptuelle et formalisation** de prototypes de PODs réalisée à dire d'expert et d'expérimentations complémentaires.
2. **Evaluation expérimentale** en réseau des prototypes à l'**échelle parcellaire** afin de cerner les points forts et les limites de ces prototypes et d'envisager des évolutions. Cette évaluation porte sur des critères agronomiques, économiques et environnementaux.
3. Passage à la **mise en œuvre à l'échelle de l'exploitation**. Cette étape constitue un enjeu majeur pour le développement de ces prototypes. Elle a été abordée par plusieurs approches : (i) une évaluation expérimentale à échelle de l'exploitation, (ii) des travaux méthodologiques sur la séparation de l'exploitation en îlots pertinents pour la mise en œuvre de ces prototypes, (iii) une évaluation des freins et des leviers pour l'adoption de ces prototypes par les opérateurs. La modélisation des processus de décision aux échelles des parcelles ou îlots et leur coordination au niveau de l'exploitation pour le bon usage des ressources joue également un rôle dans cette élaboration.

Ce projet s'intéresse particulièrement aux deux bio-agresseurs majeurs du vignoble que sont le mildiou et l'oïdium. Il s'appuie sur un prototype de POD nommé Mildium®, proposé au cours d'un précédent projet ANR-ADD « vin et environnement ». En complément, **une démarche de modélisation « bioéconomique »** a été entreprise afin d'intégrer, à l'échelle d'une parcelle, les différentes dimensions de la question (agronomique, phytopathologique, phytoprotection, économie), en cherchant

à évaluer les conséquences de la variabilité des facteurs clefs sur le risque de perte de rendement ; les phases d'expérimentation ne permettant pas toujours d'explorer toute la gamme de cette variabilité.

Le partenariat mis en œuvre au sein de ce projet se caractérise par sa pluridisciplinarité (pathologistes, économistes, agronomes, sociologues, automaticiens) ainsi que par la collaboration d'organismes de recherche (INRA, Irstea, Bx Sc Agro) et de développement (IFV, Chambres d'agriculture) afin de tirer parti de la démarche expérimentale à grande échelle pour engager simultanément le transfert des résultats obtenus.

1. Conception et évaluation technico-économique du POD Mildium® à l'échelle de la parcelle.

Le prototype POD Mildium® fournit une description détaillée de la séquence de décisions de traitement contre le mildiou et l'oïdium (Léger *et al.*, 2010 ; Delière *et al.*, 2009). Il a été conçu à dire d'experts afin d'adapter le nombre et le positionnement des traitements fongicides au développement des maladies à l'échelle parcellaire, et a pour objectif une réduction significative du nombre d'applications. Le principe général du prototype est basé sur l'application d'un nombre faible de traitements obligatoires (2 anti-mildiou, 2 anti-oïdium), et de maîtriser les épidémies sévères à l'aide de traitements optionnels. Ces traitements optionnels sont appliqués sur la base d'indicateurs simples : observations de symptômes, prévisions météorologiques, indices de risques globaux. Des contraintes opérationnelles ont été incluses lors de la conception comme la gestion des deux bio-agresseurs au sein du même processus et la limitation du nombre d'observations. Le prototype est chronologiquement décomposé en 7 étapes, du débourrement jusqu'à la véraison. Lors de chaque étape, les indicateurs sont combinés afin de décider de l'opportunité d'un traitement contre toute ou une partie des bio-agresseurs.

La terminologie Processus Opérationnel de Décision est issue de la notion de workflow, littéralement « flux de travail », à la base de l'analyse des processus métiers souvent pratiquée en génie logiciel et des systèmes d'information. « Processus Opérationnel de Décision » traduit « decision workflow », et ce concept est au cœur de la démarche de modélisation de la décision mise en œuvre dans ce projet (Léger, 2008). L'activité de décision, coûteuse en temps et réclamant organisation et procédures, est considérée comme un travail à part entière. Lorsqu'on considère la protection contre les maladies polycycliques, la mise en œuvre ne peut pas être dissociée du raisonnement en cours de saison qui est très tactique. Avec la démarche POD, on met en avant la notion de séquence d'états ou d'activités, ainsi que la notion de synchronisation des différents sous-processus impliqués dans la prise de décision. La modélisation dans un langage de processus formel à base d'automates, les Statecharts, a permis d'explicitier les contraintes temporelles critiques, puis de réaliser un cahier de protocole décisionnel très précis, ce qui autorise la réalisation d'expérimentations par de nombreux expérimentateurs n'ayant pas participé à l'élaboration du prototype original. Dans ce projet, les modélisateurs ont également participé à des expérimentations et aux discussions de bilan après chaque campagne expérimentale annuelle. Ainsi, les possibilités d'adaptation de Mildium® ont pu être discutées avec une vision d'ensemble du processus.

Le prototype POD Mildium® a ainsi pu être évalué de 2008 à 2011 sur un réseau de parcelles expérimentales réparties sur le vignoble français (vignoble de zone atlantique, septentrionale et méridionale), avec l'appui de nombreux partenaires de Chambres d'Agriculture, d'Instituts techniques ou d'interprofessions. Il a été mis en œuvre sur des parcelles de tailles compatibles avec la pratique viticole (0,2 à 1 ha). Le recueil des indicateurs et les prises de décisions ont été réalisés par les expérimentateurs, les applications effectuées par les viticulteurs. Le terme de comparaison (« control ») du prototype Mildium® est constitué par les pratiques habituelles du viticulteur (non formalisées) sur la même parcelle.

1.1 Evaluation des performances techniques

L'évaluation des performances techniques a porté sur plusieurs critères : (i) la pression pesticide (Indice de Fréquence de Traitement), (ii) les dégâts de mildiou et d'oïdium observés sur les grappes à véraison et sur les feuilles à la récolte, (iii) l'évaluation qualitative par le viticulteur de la performance de la protection et de son impact sur la quantité et la qualité de récolte. Elle porte sur trois paramètres : l'aspect visuel, la quantité et la qualité de récolte. Ces paramètres peuvent être jugés (1) satisfaisants (2) acceptables ou (3) non satisfaisants. Ces données ont été recueillies sur un total de 84 situations (site x année).

Les résultats obtenus au sein de ce réseau, dans des conditions de pressions parasitaires variables (région/année), montrent que l'application du protocole Mildium® permet un gain moyen d'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) aussi bien sur le mildiou que sur l'oïdium (Figure 1a,b). Une réduction globale de l'IFT mildiou-oïdium est observée sur 98% des sites et elle est supérieure à 30% dans 77% des situations. Ce prototype de décision apparaît donc robuste et permet de bien répondre à différents types de développements épidémiques : oïdium drapeaux / cleistothèces, épidémies précoces de mildiou, épidémies quasi nulles, etc... Par ailleurs, la mise en œuvre de traitements obligatoires (parfois inutiles) n'entraîne pas d'augmentation de l'IFT, notamment dans le cas d'une pression parasitaire très faible comme cela était le cas en 2011 pour le mildiou.

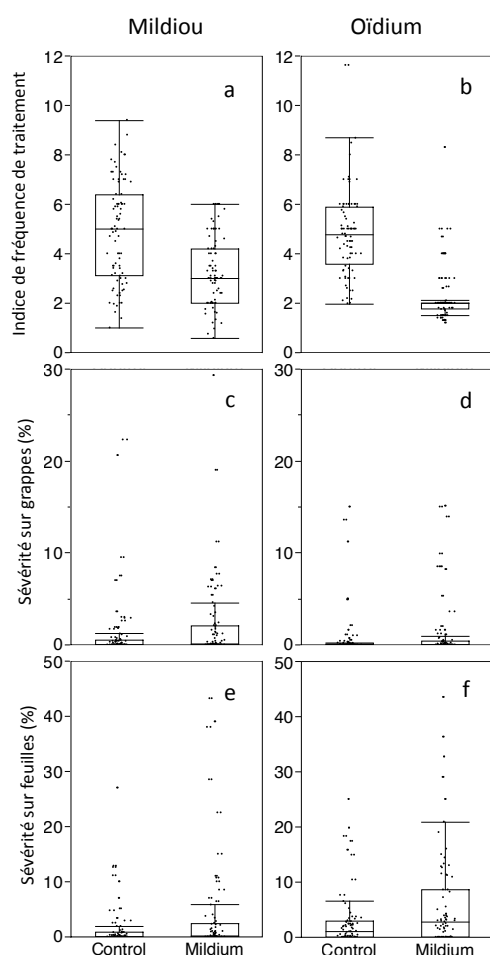


Figure 1 : Distribution de l'Indice de fréquence de traitement (a, b), des dégâts sur grappes (c, d) et des dégâts sur feuilles (e, f) pour le mildiou (a, c, e) et l'oïdium (b, d, f) sur les parcelles Mildium et Control.

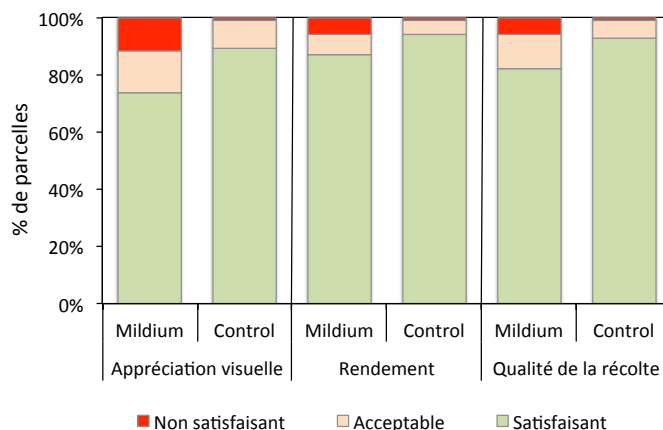


Figure 2 : Appréciation qualitative par les viticulteurs de l'impact du mildiou et de l'oïdium sur la récolte (% de parcelle dans la classe).

Les niveaux de maladies observés sont souvent supérieurs à ceux obtenus avec les traitements classiques, particulièrement pour le mildiou et dans une moindre mesure pour l'oïdium (Figure 1 c,d,e,f). Ces niveaux restent néanmoins faibles dans une très grande majorité des cas. Ainsi, selon

l'appréciation qualitative des viticulteurs, les performances de Mildium® n'entraînent aucun impact sur la récolte dans plus de 80% des cas et restent acceptables dans plus de 90% des situations (Figure 2). Cependant, certaines situations d'échecs avec des pertes de récolte quantitatives et/ou qualitatives jugées inacceptables par le viticulteur ont été observées. Ces situations permettent d'apporter des informations sur les limites du prototype et d'envisager les évolutions nécessaires pour un transfert à plus grande échelle auprès des opérateurs.

De manière complémentaire, les performances de Mildium® ont été comparées à celles d'une autre méthode visant également une limitation du recours aux intrants, mais en jouant principalement sur la modulation des doses. Cette stratégie, appelée Optidose®, est développée par l'IFV (Davy *et al.*, 2010). Les décisions de traitements sont prises par les viticulteurs mais pour chaque application, la dose de produit est calculée sur la base d'un algorithme incluant trois paramètres (i) le stade phénologique, (ii) le volume de végétation et (iii) la pression parasitaire (www.vignevin-epicure.com/). Ces différentes méthodes ont été comparées entre 2008 et 2011 à l'aide d'un réseau de parcelles en Gironde (15 situations). Les résultats montrent que les réductions d'IFT sont équivalentes pour ces deux approches, avec une réduction du nombre de passages plus importante avec Mildium®. De la même manière, les efficacités des deux stratégies sont comparables, l'application d'Optidose® apportant une efficacité sur le feuillage légèrement supérieure à celle obtenue avec Mildium® (et inversement pour la récolte).

1.2 Evaluation des performances économiques

Malgré ces résultats, les résistances à l'adoption de modes de production plus respectueux de l'environnement rencontrées chez les chefs d'exploitations viticoles semblent fréquemment liées à la difficulté d'évaluer l'impact sur les coûts d'un changement des modes de production (Laporte et Pichery, 1996 ; Pailler, 1998). Il s'agit donc ici de pouvoir évaluer l'impact sur les coûts de la mise en œuvre de Mildium® sur les parcelles afin de s'assurer de proposer des solutions phytosanitaires économiquement viables.

Afin de repérer les évolutions de coût lors d'un changement de pratiques phytosanitaires, nous avons comparé la consommation de facteurs de production utilisés dans les entreprises entre les pratiques des viticulteurs (nommées ici « control ») et les pratiques liées à la mise en œuvre du POD Mildium®. Dès lors que les différentes opérations culturales composant une stratégie phytosanitaire ont été repérées, nous avons calculé le coût de chaque opération selon les principes de la méthode *Operation Based Costing* (OBC) (Ugaglia, 2009), qui prend en compte les charges directes entièrement affectables aux opérations et les charges directes traçables partiellement affectables. Le coût de la stratégie a ensuite été obtenu en sommant le coût des opérations qui la composent. Nous avons ainsi montré que le coût des traitements est en moyenne inférieur pour les parcelles traitées avec le POD Mildium® par rapport aux parcelles « control » grâce aux intrants économisés (Figure 3). Cependant, nous avons observé une certaine hétérogénéité du coût des processus de protection du vignoble pour l'ensemble des parcelles étudiées, particulièrement pour ce qui concerne la stratégie « control », dénotant une plus grande variabilité dans les pratiques habituelles des viticulteurs.

Ensuite, nous avons mis en évidence un impact économique variable selon les régions viticoles concernées, notamment compte-tenu des pratiques habituelles des viticulteurs (« control ») et donc des économies en moyenne plus importantes en Champagne. Pour le mildiou, les économies réalisées ont été plus importantes dans les vignobles des zones atlantiques et septentrionales que dans les vignobles méridionaux. Concernant l'oïdium, nous n'avons observé aucune différence significative entre les régions. Concernant la taille des entreprises, l'économie a été la plus forte pour les exploitations de petite taille. Nous avons également constaté que la réduction est possible toutes les années, y compris celles à faible pression parasitaire comme 2011. Par contre, nous n'avons mis en évidence aucun effet

du cépage. Ces résultats traduisent le fait que sur les parcelles Mildium® on observe une réduction de coût indépendamment du contexte de l'exploitation.

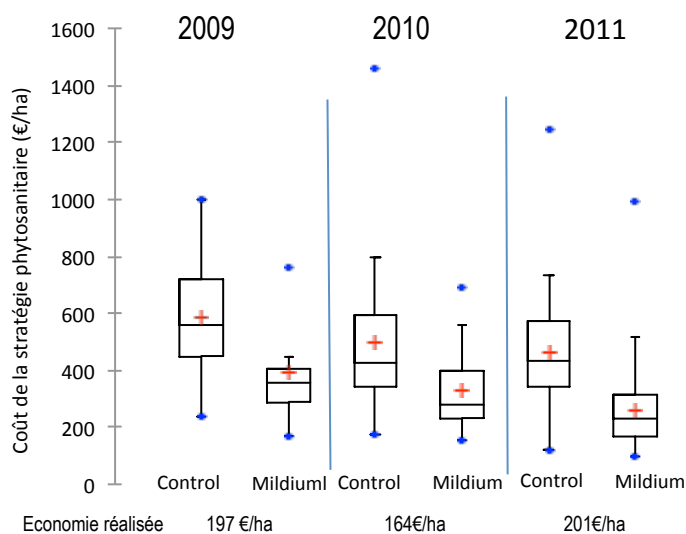


Figure 3 : Comparaison du coût du processus de protection phytosanitaire selon la stratégie et les années.

Les observations, durant la période de test du POD Mildium®, ont été réalisées par des personnes des organismes partenaires du programme et n'ont donc généré aucune charge dans les exploitations. Or, la mise en œuvre du POD Mildium® à l'échelle de l'exploitation nécessite une prise en charge de leur coût. Ce type de charge n'a jamais été pris en compte dans les calculs et simulations effectués dans le rapport Ecophyto R & D qui ne s'intéresse ni aux charges de main-d'œuvre ni aux charges de suivi parcellaire (Mezière *et al.*, 2009). Ceci nous a amené à évaluer l'économie réalisée en tenant compte des coûts d'observations. Deux possibilités ont ici été testées pour la réalisation des observations. Les viticulteurs pourraient avoir à assurer cette mission par eux-mêmes ou bien faire appel à un prestataire de services. Dans le premier cas, 57 % des exploitations continuent à réaliser une économie en dépit de la comptabilisation du coût des observations (référence standard). Dans le deuxième cas, environ la moitié des exploitations réalisent une économie en dépit du coût des observations.

Les économies mises en évidence constituent un avantage pour l'adoption de Mildium®, dans la mesure où certains conseillers d'exploitation affichent la réduction des charges comme un des principaux objectifs de gestion des viticulteurs, compte tenu de l'importance des coûts dans ce domaine (Aujas *et al.*, 2011). Il y a donc possibilité de maintenir, voire d'augmenter, la marge des exploitations tout en améliorant l'impact des pratiques phytosanitaires. En tous les cas, le POD Mildium® n'engendre pas de surcoût significatif *a priori*, comme semblaient le suggérer d'autres travaux par rapport au ressenti des viticulteurs (Saint-Gès, 2006). Pour des performances agronomiques équivalentes, les exploitations maintiennent, voire améliorent, leur performance économique selon les indicateurs analysés, toutes choses étant égales par ailleurs.

2 – Possibilité de mise en œuvre du POD Mildium à l'échelle de l'exploitation

2.1 Approche expérimentale : création d'îlots, performances techniques

Les stratégies de traitement expérimentées visent à adapter le nombre et le positionnement des traitements aux épidémies observées à l'échelle parcellaire. La gestion des traitements phytosanitaires d'une exploitation se réalisant généralement à partir de regroupement de parcelles en îlots, il est nécessaire de trouver la parcelle d'observation qui représentera le mieux l'état sanitaire de l'îlot et qui conditionnera les traitements à appliquer à l'îlot. Les données bibliographiques (Goulet *et al.*, 2006)

rèvelent des variables explicatives potentiellement impliquées dans la sensibilité aux maladies, sensibilité variable entre différentes parcelles, sises pourtant sous les mêmes conditions météorologiques : (i) facteurs « sol » (texture, profondeur, réserve en eau), (ii) facteurs « plante » (cépage, âge, précocité), (iii) facteurs « mode de conduite » (densité de plantation, type taille, palissage, enherbement). A ces trois catégories, s'ajoute une quatrième, plus synoptique : le facteur « paysage » (altitude, orientation, pente, ouverture, vent...). Mais le viticulteur croise rarement toutes ces indications et les îlots sont plus généralement constitués « à dire d'experts » : taille minimum pour réaliser une application, proximité de l'exploitation, sensibilité constatée aux maladies (mildiou et/ou oïdium), cépages.

Sur le Domaine du Grand Parc, propriété de l'INRA sur la commune de Latresne (AOC Côtes de Bordeaux), un protocole de mise en œuvre et de suivi du POD Mildium® à l'échelle d'une exploitation viticole a été créé. L'exploitation (8,7ha) comprend de nombreuses petites parcelles présentant des variabilités importantes en termes topographique, pédologique et de cépages. A partir de 24 parcelles 4 îlots ont été constitués « à dire d'experts ». Pour chaque îlot, une parcelle de référence a été choisie. Pour les observations nécessaires aux prises de décision, deux méthodes sont comparées : (i) sur chaque parcelle de référence, un échantillonnage de 10% des ceps sur une zone de 1000 ceps, (ii) sur l'ensemble des parcelles de chaque îlot, avec un échantillonnage de 2% des ceps. Les décisions de traitement sur l'ensemble de l'îlot ont été prises sur la base des observations relevées sur les parcelles de référence.

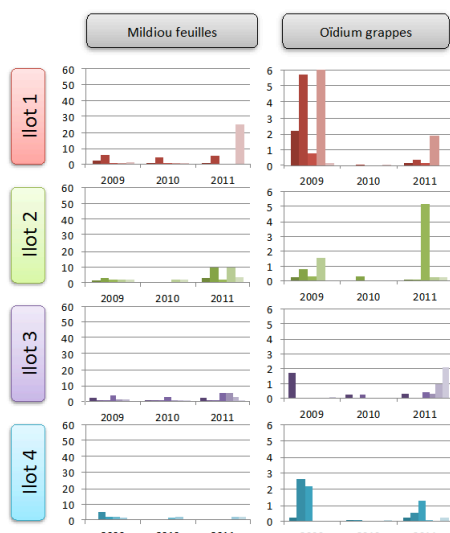


Figure 4 : Sévérité d'attaque (%) de mildiou sur feuilles et d'oïdium sur grappes pour 3 années et pour chaque îlot

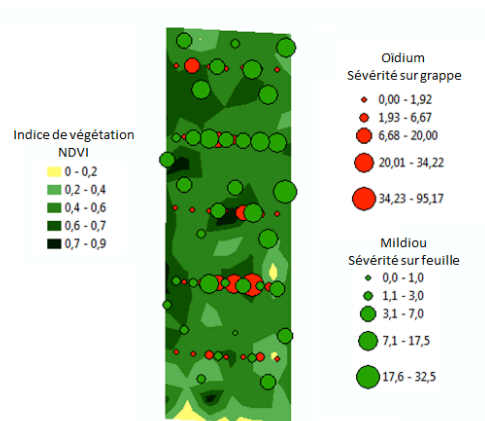


Figure 5 : Variabilité de la sévérité d'attaque (%) Oïdium Mildiou et de la vigueur de la vigne (NDVI) sur une parcelle (0,20 ha) et pour 2009.

La Figure 4 montre les performances du prototype en termes de niveaux de maladie observés sur les feuilles et sur les grappes. Pour le mildiou, les niveaux d'attaque sur grappes ont toujours été faibles (<2%), avec une certaine variabilité au sein des îlots. Les niveaux d'attaque sont également restés faibles sur le feuillage, avec quelques parcelles plus attaquées en 2011 (îlots 2 et 3). Pour l'oïdium, deux parcelles ont montré des niveaux d'infestation sur grappes légèrement supérieurs à 5% (2009 îlot 1 et 2011 îlot 2). La variabilité est très importante au sein des îlots et même au sein des parcelles (Figure 5). La variabilité de la vigueur de la vigne a été mesurée sur l'ensemble des parcelles par l'indice de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation index) réalisé au sol avec le capteur « greenseeker® » installé sur un tracteur (Drissi *et al.*, 2009). Une analyse des correspondances multiples (AFM) réalisée sur des variables quantitatives et qualitatives, croisant « maladies » « plantes » (NDVI, cépage, âge, âge), « sol » (carte des sols numérisée) et « plantes » révèle une relation entre

l'indice de végétation (NDVI) et la sévérité d'attaque du mildiou sur feuilles ou de l'oïdium sur grappes. Ce dispositif demanderait à être complété par des mini centrales météorologiques afin de prendre en compte les gradients de température et d'hygrométrie, occasionnés par la topographie (étagement des parcelles sur des pentes à 5% nord et sud, dénivelé de 20 m...) et la proximité de bois. La hiérarchisation des facteurs du milieu (autres que la pluviométrie et la température à l'échelle synoptique) impactant la sensibilité d'une parcelle aux maladies fongiques, demeure (i) une étude complexe à l'échelle parcellaire et inter-parcellaire, et (ii) primordiale si l'on veut disposer d'îlots homogènes en termes de maîtrise des maladies.

2.2 Evaluation des freins et leviers d'adoption

Une **évaluation ex post** de la mise en œuvre du POD dans les exploitations du réseau expérimental (situation de connaissance de l'innovation sur une parcelle de l'exploitation) permet de mener une analyse pour savoir si les économies mises en évidence précédemment sont assez importantes pour agir comme un moteur de l'adoption de pratiques de type POD Mildium®. L'enquête a mis en évidence plusieurs freins concernant la mise en œuvre et l'adoption du POD. L'analyse des pratiques phytosanitaires habituelles des viticulteurs nous a tout d'abord permis de montrer que les exploitations ont des savoir-faire et des pratiques cohérentes avec le POD Mildium®. Elles ont cependant des compétences à acquérir concernant les protocoles d'observation et l'identification des maladies à un stade précoce. La valorisation des informations collectées sur les parcelles et à l'extérieur n'est pas optimisée pour déclencher les traitements. Enfin, le découplage des traitements Mildiou et Oïdium n'est pas habituel. Dans tous les cas, l'enquête montre que les économies réalisées sur les parcelles Mildium® ne sont pas suffisantes pour déclencher la décision d'adoption des viticulteurs à l'échelle de l'exploitation, d'autant qu'elles ne représentent qu'une petite partie du coût de production.

Ensuite, une **évaluation ex ante** auprès de viticulteurs non inscrits dans ces démarches environnementales a été réalisée afin de mettre en évidence une plus large gamme de freins et de leviers à leur mise en œuvre (situation de non pratique, voire de non connaissance de l'innovation). Cinq points particuliers sont à souligner :

- Concernant la *reconnaissance des maladies*, si les viticulteurs déclarent reconnaître facilement les symptômes de mildiou sur feuilles, la reconnaissance de l'oïdium n'apparaît pas possible sur feuilles à un stade précoce (à l'exception des cépages extériorisant la maladie sous forme de « drapeaux »). Elle est reconnue plus tard sur les grappes. Certains agriculteurs « reconnaissent » toutefois l'oïdium précocement mais en ayant recours à un indicateur non répertorié et promu par les scientifiques et les conseillers agricoles.
- Concernant l'*organisation des observations*, la moitié des viticulteurs enquêtés (ceux ayant le plus haut niveau de formation initiale) planifie expressément des chantiers spécifiques d'observation entre deux traitements, alors que l'autre moitié réalise les observations en effectuant une autre tâche.
- Concernant la *localisation des observations*, tous les viticulteurs ou presque observent des parcelles de « référence » (cépages sensibles pour l'oïdium, secteurs géographiques particuliers pour le mildiou), avec éventuellement des observations complémentaires pour affiner le diagnostic.
- Quand il s'agit d'utiliser ces observations *pour décider* de déclencher un traitement, la décision dépend également d'autres informations provenant de l'environnement de l'exploitation, du stade de la vigne et du climat ; cependant, l'aversion aux risques des viticulteurs détermine ensuite dans quel sens est prise la décision (généraliser ou pas les traitements dans toute l'exploitation, sur-traiter ou pas certaines parcelles).
- Enfin, concernant le *découplage des traitements contre le mildiou et l'oïdium*, les viticulteurs mélangent majoritairement les produits pour traiter en même temps contre les deux maladies, ce qui occasionne des sur-traitements. Même si techniquement tous les viticulteurs reconnaissent la possibilité de découpler, peu le font véritablement à cause des surcoûts potentiels, de la structure du vignoble et

de la surface à traiter par pulvérisateur disponible. L'aversion aux risques en fonction du mode d'élaboration du revenu et du statut du chef d'exploitation joue également ici un rôle non négligeable.

Les éléments issus des deux enquêtes auprès de viticulteurs tendent à montrer le degré de rupture avec les pratiques habituelles des viticulteurs. Les conclusions des deux enquêtes semblent assez proches. Les critères économiques objectifs entrent peu en jeu pour choisir la réduction d'intrants, l'effet « modification des coûts » n'étant pas identifié comme un critère de choix. Par contre, le risque encouru perçu par le viticulteur est un frein incontestable. Pour surmonter celui-ci, la meilleure connaissance des maladies et de leur développement, la meilleure lecture des symptômes sur la vigne, autrement dit la meilleure compétence des viticulteurs pour maîtriser les interventions nécessaires est un levier réel permettant d'envisager une réduction significative des produits phytosanitaires. Et cet accroissement nécessaire des compétences pour mieux maîtriser repose en partie sur la possibilité d'accompagner les viticulteurs pendant leur apprentissage, accompagnement sans doute à réaliser par les principales structures collectives en agriculture.

2.3 Modéliser les processus : une question opérationnelle

Le POD Mildium® a été conçu sur la base de la notion d'étape. Cette notion d'étape permet d'attacher un objectif spécifique à une période du cycle végétatif et de décrire la procédure décisionnelle en conséquence. Sans changer de type de langage de modélisation, il serait possible, au stade des adaptations à un changement d'échelle ou à un contexte bioclimatique particulier, de garder une représentation des objectifs spécifiques par période sans imposer une séparation temporelle aussi nette des étapes, qui se traduit par exemple par une précédence stricte entre étapes et comptages. Ceci permettrait de gérer plus facilement les ressources partagées entre plusieurs PODs en cours sur une même exploitation. La nature de la transformation à réaliser est illustrée dans la Figure 6.

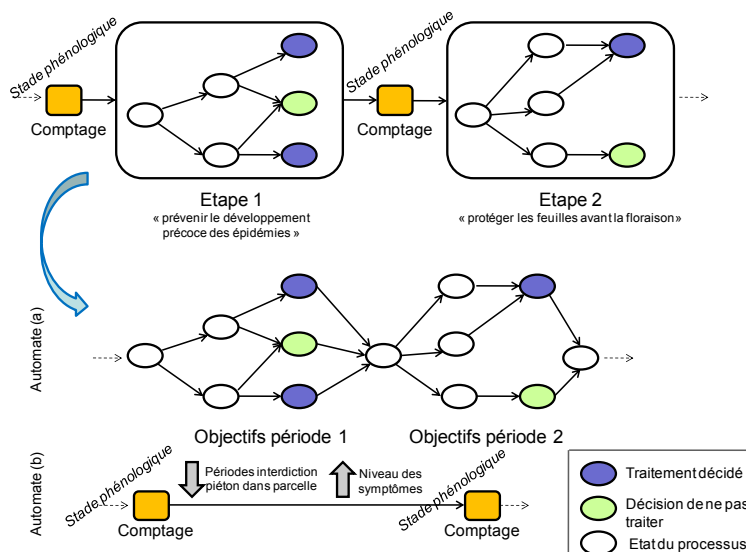


Figure 6 : Transformation d'un automate unique en 2 automates avec échange de données

Une autre possibilité pour assurer le changement d'échelle décisionnelle entre l'échelle de la parcelle (ou du petit îlot) et l'échelle de l'exploitation est d'optimiser la mise en œuvre des traitements décidés pour chaque parcelle ou îlot avec une étape spécifique. Le schéma de principe de ce changement d'échelle est donné dans la Figure 7. Ce problème a été défini formellement et est analogue du point de vue de la recherche opérationnelle à celui d'un routage de véhicules avec contrainte de capacité (taille du réservoir du pulvérisateur), fenêtre de temps et routes multiples.

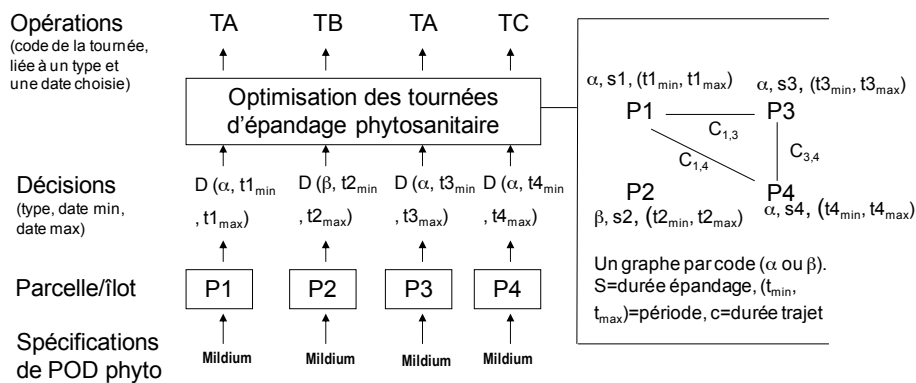


Figure 7 : Optimisation des épandages suite à des décisions prises par parcelle ou flot

Il est à noter qu'une procédure d'optimisation analogue pourrait également être mise en œuvre pour organiser la surveillance des parcelles (comptage des symptômes), avec la différence qu'une tournée d'observations n'impose pas de contrainte en capacité de transport du véhicule.

3 – Modélisation bioéconomique

3.1 Structure du modèle

Le modèle bioéconomique a été structuré comme suit (Figure 8):

- Une parcelle caractérisée par: un sol, un cépage, un objectif de rendement, un mode de conduite.
- Deux sources de variabilité sont prises en compte : (1) la variabilité climatique en confrontant le modèle à un ensemble d'années selon les données météorologiques enregistrées localement ; (2) une variabilité de la pression initiale des deux pathogènes.
- Les données de développement et de croissance de la vigne (feuilles & raisins) sont issues du modèle STICS-Vigne qui fournit leurs valeurs potentielles, hors maladies, pour chaque année.
- Un module de développement des pathogènes qui évalue, pour chaque scénario Année x Pressions initiales, leur dynamique d'infection (primaires et secondaires) sur feuilles et raisins.
- Différentes stratégies de traitements, décrites par des règles, génèrent pour chaque scénario un calendrier d'actions (traitements, observations) ; actions dont on peut caractériser les effets et l'efficacité. Les dégâts foliaires et les dommages résultants sur la récolte sont alors simulés pour chacun des scénarios.
- Les conséquences économiques sont évaluées selon les données de contexte (rendement d'appellation, prix de vente du raisin, coûts unitaires) pour chaque Stratégie x Année climatique x Pressions initiales.
- L'ensemble des résultats simulés sont présentés sous la forme de statistiques servant de base à une analyse des risques associés aux stratégies de protection envisagées.

3.2 Calibration et validation du module phytopathologique

Les paramètres du module phytopathologique (développement du pathogène, dégâts foliaires et dommages sur la récolte) ont été calibrés puis validés sur la base d'observations des sévérités sur les feuilles et les raisins pour le mildiou et l'oïdium sur des parcelles non traitées de merlot dans le cadre du réseau d'observation en Aquitaine géré par l'IFV sur la période 2006-2010, et sur trois parcelles en Entre-deux-mers et une parcelle en Médoc. Trois parcelles-années ont été utilisées pour le calibrage, les autres pour la validation. La validation a montré pour les deux pathogènes que la très grande partie des épidémies (sans traitements), selon différents niveaux (de très fortes à très faibles), pouvaient être très bien simulées, mais qu'il restait des cas hors des hypothèses du modèle (exemple : dommages sur

la récolte conséquents avec des dégâts foliaires assez faibles). Toutefois pour l'oïdium, sur ces jeux de données, la gamme des niveaux d'épidémie exploré est peut équilibrée, ce qui relativise la validité des valeurs des paramètres issus de cette phase de calibration-validation.

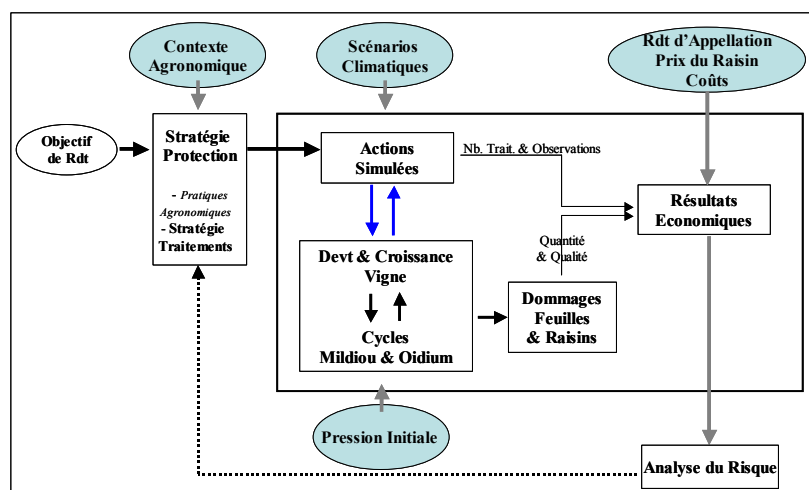


Figure 8 : Principes et structure du modèle bioéconomique.

3.3 Utilisation du modèle en simulation pour différentes stratégies de traitement

Les simulations ont été conduites pour une parcelle de merlot à partir des données climatiques de Bordeaux - « La Ferrade » de 1988 à 2010. Les valeurs de pression initiale des pathogènes (infections primaires) sont exprimées sous la forme d'une gamme de valeur assortie d'une distribution de probabilité. La gamme des valeurs retenue est celle obtenue lors de la phase de calibrage-validation sur les 20 parcelles-années utilisés. Nous avons choisie : (i) pour le mildiou une distribution de probabilité symétrique autour d'une valeur centrale ; (ii) pour l'oïdium une distribution de probabilité égale aux fréquences des niveaux d'infections primaires issues de la phase de calibrage-validation.

Les stratégies de traitement envisagées sont : une stratégie de traitements systématiques tous les 14 jours entre les stades 6 feuilles et le stade véraison + 8 jours pour le mildiou, fermeture de la grappe pour l'oïdium, stratégie proche de la stratégie traditionnelle ; deux autres stratégies systématiques en ne faisant varier que la fréquence de retour (21 jours, 28 jours) ; la stratégie Mildium® ; enfin la stratégie non traitée comme référence. L'efficacité des traitements sur feuilles et raisins a été caractérisée selon trois paramètres : un taux maximum d'efficacité (proportion d'organes protégés) fixé à 90%, une durée d'efficacité maximale durant 12 jours puis décroissante pendant 4 jours.

Nous nous sommes placés dans le cadre de l'AOC « Bordeaux » avec un rendement d'appellation de 8t/ha et un prix de vente du raisin de 600 €/t (prix 2010). Dans le cas où la qualité sanitaire simulée de la récolte est trop dégradée (estimée par la sévérité sur raisins), ce prix de vente est réduit de 25% pour plus de 20% d'infestation pour le mildiou et plus de 10% pour l'oïdium. Concernant les traitements, nous avons utilisé les données suivantes : 38 €/ha pour le coût d'un passage, 32 €/ha pour le coût d'intrants d'un traitement contre le mildiou, 16 €/ha contre l'oïdium et 44 €/ha lorsque les deux pathogènes sont traités conjointement. Le coût unitaire d'observation pour Mildium® a été fixé à 60 €/ha (hypothèse pessimiste). La marge calculée n'est que partielle car elle n'intègre que les coûts des intrants et des

observations¹. La Figure 9 présente la statistique de cette marge partielle ainsi que celle du nombre de traitements².

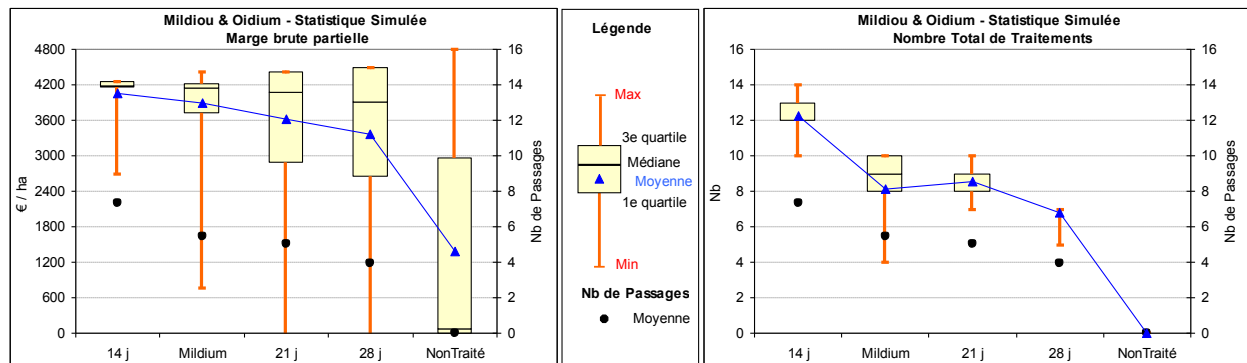


Figure 9 : Statistiques de la marge partielle et du nombre de traitements

Ces résultats simulés montrent que la marge moyenne de la stratégie Mildium® reste assez proche de la stratégie traditionnelle (-157 €/ha) mais avec une variabilité plus importante, et avec une réduction moyenne d'1/3 du nombre de traitements. La perte de marge simulée en moyenne et en variabilité de la stratégie Mildium® est nettement supérieure à ce qui a été observé lors des essais conduits à la parcelle sur de nombreux sites. Cette différence est essentiellement due : (i) en partie à une surestimation volontaire des coûts d'observation, coûts qui doivent être validés lors du passage de l'échelle parcelle à l'échelle exploitation, (ii) en grande partie soit à une surestimation des pressions initiales de l'oïdium, soit à une mauvaise estimation des paramètres phytopathologiques pour ce pathogène. Toutefois, la comparaison avec les stratégies systématiques dégradées indique clairement que seules des stratégies raisonnées peuvent conduire à un maintien du niveau du rendement commercialisable qui est, dans ce contexte, l'indicateur le plus pertinent.

Nous avons également testé dans ce contexte des outils d'incitation aux changements des pratiques de traitement³ : (i) public, comme une taxe sur les produits de traitement : son niveau nécessaire serait de 200 à 300% ; (ii) privé, via par exemple la mise en place de labels certifiant la qualité environnementale pour des vins issus de raisins produits selon des cahiers des charges visant à réduire l'usage des pesticides : l'augmentation du prix du raisin nécessaire serait entre 2 et 4%, ce qui se traduirait pour ces vins par une augmentation du prix de vente aux consommateurs inférieure à 0.05 €/bouteille.

Conclusion.

Ce projet a permis de montrer qu'une formalisation stricte et temporellement précise des règles de décision d'opportunité des traitements contre le mildiou et l'oïdium peut entraîner une réduction de l'usage des fongicides. En effet, le prototype Mildium®, expérimenté dans des conditions agro-climatiques variées, a montré des performances agronomiques intéressantes avec une réduction des IFT de 30 à 50% par rapport aux pratiques habituelles. Même si son application se traduit régulièrement par une augmentation du niveau des symptômes, celui-ci reste très majoritairement non préjudiciable à la quantité et à la qualité de la récolte. Par ailleurs, la mise en œuvre de ce prototype n'entraîne pas de surcoûts importants, y compris en y incluant les temps d'observation nécessaires.

² Le nombre de traitements cumule les traitements contre le mildiou et l'oïdium. Le nombre de passages est différent car pour les stratégies systématiques les traitements sont conjoints, ce qui n'est pas toujours le cas pour Mildium®.

³ En cherchant à égaliser les marges moyennes entre la stratégie traditionnelle et Mildium®.

Néanmoins, les cas d'échecs rencontrés montrent que ce prototype ne peut être appliqué en toutes situations comme une simple « recette » et doit faire l'objet d'adaptations aux contextes locaux des exploitations. Toutes les enquêtes menées dans le cadre de ce projet montrent également que les freins à l'adoption de ce type de stratégie restent nombreux dans les exploitations. Le principal est constitué par une méfiance vis-à-vis de changements de pratiques perçues comme très risquées, les pertes de récolte n'étant économiquement pas acceptables dans la majorité des situations. Les autres freins concernent l'organisation du travail parfois peu adaptée à la mise en œuvre de ce type de prototype à l'échelle de l'exploitation ou encore les compétences techniques nécessaires pour réaliser des observations. Le changement d'échelle constitue à ce titre un enjeu majeur. De nombreux travaux spécifiques restent à conduire afin de faciliter la mise en œuvre de ces méthodes à l'échelle opérationnelle que représente l'exploitation viticole. L'ensemble des techniques d'agriculture de précision mais également la modélisation des processus pour adapter les étapes et les objectifs du POD aux types de climats et d'exploitations doivent permettre de proposer des pistes de travail.

Ces travaux ont également montré que la diffusion à grande échelle de ce type de démarche ne peut être faite sans un accompagnement étroit des viticulteurs. Mais il semble au préalable nécessaire de sensibiliser les conseillers en charge de cet accompagnement car les pratiques mises en œuvre dans ce prototype sont parfois très différentes des pratiques raisonnées préconisées actuellement (traitements très précoces contre l'oïdium, découplage des traitements mildiou et oïdium, cadences de traitements non régulières, possibilité d'impasses y compris en période de sensibilité, etc.). L'organisation et l'animation du réseau expérimental constitué dans le cadre de ce projet, associant étroitement recherche et développement, a constitué un atout pour atteindre cet objectif. Cet outil peut maintenant être plus aisément pris en main par ces organismes afin de les intégrer dans leurs stratégies de développement.

Ainsi, plusieurs expériences ont pu être mises en place dès 2010. En Gironde, la Chambre d'Agriculture a réalisé un accompagnement de plusieurs exploitations du Médoc. Le prototype Mildium® a été appliqué sur des îlots d'environ 5 ha, la Chambre d'Agriculture assurant la formation du personnel de l'exploitation, le suivi d'une parcelle de référence et l'accompagnement de l'exploitation pour les observations au sein de l'îlot. Dans le vignoble du Beaujolais, la Chambre d'Agriculture du Rhône utilise le prototype Mildium® comme outil de développement auprès de 20 groupes « Protection Phytosanitaire Raisonnée ». Le prototype est appliqué sur une des parcelles des 4 à 10 viticulteurs composant chaque groupe - les observations étant réalisées en commun - et permet ainsi une réflexion au sein du groupe sur les stratégies de traitement à mettre en place. Enfin, le prototype Mildium®, couplé à des approches comme Optidose®, est utilisé dans de nombreuses Fermes du Réseau DEPHY qui représente un dispositif majeur de production de référence et de démonstration de systèmes viticoles économes en produits phytosanitaires.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des expérimentateurs et des viticulteurs qui ont participé à ce réseau expérimental. Ce travail a été soutenu financièrement par le ministère de l'Agriculture dans le cadre de l'Appel à Projet Protection Vigne.

Références bibliographiques

Aujas P., Lacroix A., Lemarié S., Reau R., 2011. Réduire l'usage des pesticides – Un défi pour le conseil aux agriculteurs, *Economie rurale* 324, 18-33.

Davy A., Raynal M., Vergnes M., Remenant S., Michez A., Claverie M., Codis S., Bernard F.M., Colombier L., Davidou L., Girard M., Mornet L., Perraud J.P., Rives C. and Vergnes D., 2010. Trials results of the « Optidose » method using an adjustment of the pesticide dose for control of downy

and powdery mildew. Proceedings of the 6th International Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew 123-125.

Delière L., Cartolaro P., Léger B., Naud O., Ugaglia A., 2009. Conception et Evaluation d'un Processus de décision de Traitements Fongicides contre le Mildiou et l'Oïdium de la Vigne. 9ème Conférence Internationale sur la Maladie des Plantes. AFPP. Tours, décembre 2009.

Drissi A., Goutouly J.P., Forget D., Gaudillère J.P., 2009. Nondestructive Measurement of Grapevine Leaf Area by Ground Normalized Difference Vegetation Index. 101, 1, 226-231.

Goulet E., Cady E., Chrétien P., Rioux D., 2006. Sensibilité de la vigne face aux maladies cryptogamiques : Utilisation croisée d'une cartographie des terroirs viticoles et d'une enquête parcellaire. VIe congrès International des terroirs viticoles 2006 - VIth International Terroir Congress. 8 p.

Laporte C., Pichery M.C., 1996. Coûts de production de vins AOC en Bourgogne. Cahier de la VDQS, n°1, avril 1997, 20 p.

Léger B., 2008. Recueil et formalisation de procédés experts pour conduire une protection intégrée du vignoble. Thèse de doctorat Montpellier SupAgro 275p Available: http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00372383_v1/ [1 avril 2009].

Léger B., Naud O., Bellon-Maurel V., Clerjeau M., Delière L., Cartolaro P. and Delbac L., 2010. GrapeMilDeWS: a formally designed integrated pest management decision process against grapevine powdery and downy mildews. In: B. Manos, K. Paparrizos, N. Matsatsinis, J. Papathanasiou (Eds). Decision Support Systems in Agriculture, Food and the Environment: Trends, Applications and Advances. IGI Global, pp 246-269.

Mezière D., Gary C., Barbier J.M., Bernos L., Clément C., Constant N., Delière L., Forget D., Grosman J., Molot B., Rio P., Sauvage D., Sentenac G., 2009. Ecophyto R&D – vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires volet 1 – Tome III : Analyse comparative de différents systèmes en viticulture, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire & Ministère de l'agriculture et de la pêche, janvier 2009, 57 p.

Paillet J., 1998. Identification et analyse des principales stratégies des domaines viticoles de l'Entre-Deux-Mers. Revue I.A.A., n°6, 8 p.

Saint-Gès V., 2006. Innovations environnementales dans la viticulture. Une lecture économique du cas girondin, Thèse ès Sciences économiques, Université Montesquieu Bordeaux IV, 286 p.

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