



Recueil et Formalisation de procédés experts pour conduire une protection intégrée du vignoble

Bertrand Léger

► To cite this version:

Bertrand Léger. Recueil et Formalisation de procédés experts pour conduire une protection intégrée du vignoble. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier - AGRO M, 2008. Français. NNT : . tel-00372383v2

HAL Id: tel-00372383

<https://theses.hal.science/tel-00372383v2>

Submitted on 1 Apr 2009

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

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



THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

Discipline : Génie des Procédés
Ecole Doctorale : SP-SA Sciences des Procédés - Sciences des Aliments

Recueil et Formalisation de procédés experts pour conduire une protection intégrée du vignoble

présentée et soutenue publiquement par

M. Bertrand Léger

Le 18 Décembre 2008

Jury :

Président : Pr Cesare Gessler (ETH, Zurich)

Rapporteurs : Dr Françoise Lescourret (INRA PSH, Avignon)

Pr Michel Combacau (Université Paul Sabatier, Toulouse)

Directeurs : Pr Véronique Bellon Maurel (Cemagref ITAP, Montpellier)

Pr Michel Clerjeau (INRA/ENITAB, Bordeaux)

Encadrant : Dr Olivier Naud (Cemagref ITAP, Montpellier)

Laboratoires d'accueils :

UMR Santé végétale INRA/ENITAB, Bordeaux

UMR Informations et Technologies pour les Agro-Procédés (ITAP)

CEMAGREF/SUPAGRO, Montpellier



à la foi et au fouet

Table des matières

Table des matières	ii
Résumé-Abstract	vi
Remerciements	x
Introduction	2
1 Contexte de la protection du vignoble	9
1.1 La pratique phytosanitaire viticole française	10
1.2 La protection intégrée des cultures	15
1.3 Les maladies cryptogamiques de la vigne	23
1.4 Les travaux de l'UMR Santé Végétale - INRA Bordeaux	34
1.5 Conclusion : le besoin d'un formalisme	36
2 Identifier un formalisme adapté aux RDD agronomique	41
2.1 Système et contrôle pour la protection intégrée des cultures	42
2.2 Cybernétique, contrôle et modélisation d'expertise	45
2.3 Fondements théoriques des systèmes à événements discrets	54
2.4 Automates	56
2.5 Réseau de Petri	61
2.6 Statecharts	64
2.7 Conclusion du chapitre	72
3 Formalisation de la décision	77
3.1 L'analyse des systèmes agraires et de la décision	77
3.2 Décision et Simulation en agriculture	80
3.3 Un autre point de vue : la modélisation d'entreprise	85
3.4 Principes du Processus Opérationnel de Décision « Mildium » pour la PIC du vignoble	89
3.5 POD, workflow et modèle d'action	96
3.6 Conclusion	99
4 Méthode du recueil de connaissances expertes	103
4.1 Introduction	103
4.2 Matériel et méthodes	103
4.3 Présentation de l'article	103
4.4 Expérimentation des Statecharts pour le recueil d'une connaissance agro- nominique auprès de multiples experts	105
4.5 Discussion du chapitre	120
4.6 Conclusion du chapitre	122
5 Le POD Mildium	125
5.1 Introduction	125
5.2 Matériel et méthode	125
5.3 Présentation de l'article	125
5.4 GrapeMilDeWS (part.1) un POD pour la protection intégrée du vignoble contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne	126

5.5	Discussion du Chapitre	156
5.6	Conclusion du Chapitre	156
6	Validation du POD	159
6.1	Simuler Mildium pour valider le recueil de connaissances	159
6.2	Matériel et Méthodes	159
6.3	Présentation de l'article	160
6.4	Article « GrapeMilDeWS (Part.2) Expérimentation d'un POD PIC contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne »	161
6.5	Discussion du Chapitre	188
7	Conclusion	193
7.1	La formalisation a mis en évidence l'intérêt de la notion de processus pour l'étude des méthodes de protection des cultures	194
7.2	Vérification automatique de procédés	197
7.3	Généricité de la formalisation de POD en dehors de la protection des cultures	201
7.4	Le mot de la fin	205
	Bibliographie	208
	Annexes	225
A	Typologie des pratiques de protection du vignoble dans le Bordelais	228
A.1	Sondage des Pratiques Phytosanitaires en Bordelais	228
A.2	Résultats de l'enquête	230
A.3	Enquête pratiques de protection du vignoble dans le bordelais	241
B	RDD2005 pre-Mildium	247
C	Version initiale du protocole de recueil de connaissance	248
C.1	Objectifs du document	249
C.2	Recueil	250
C.3	Déroulement Organisation	253
C.4	Critiques	255
D	Stratégies phytosanitaires bordelaises	258
D.1	Exploitation M. B	258
E	Donnée sources pour les scénarios de simulation	264
	Liste des abréviations	268
	Table des figures	271
	Liste des tableaux	275

Résumé-Abstract

Résumé

La viticulture française est un gros consommateur de produits phytosanitaires. Deux maladies fongiques, l'oïdium et le mildiou de la vigne, représentent à elles seules 70% des dépenses annuelles de pesticides pour cette culture. Ces maladies peuvent causer la destruction complète des récoltes, et sont ressenties comme des fléaux. Face à de tels risques, seule la protection chimique est aujourd'hui efficace.

Une équipe de phytopathologiste (Santé Végétale à Bordeaux) a entrepris en 2001 de résoudre le problème difficile de la conception et de la mise au point de systèmes décisionnels de gestion des maladies de la vigne. Ces systèmes innovants doivent faire la preuve qu'il est possible de produire du raisin de qualité en diminuant fortement le nombre de traitements fongiques, conformément aux principes de la Protection Intégrée des Cultures (PIC). L'équipe y parvient en utilisant des observations à la parcelle et une connaissance structurée qui prend la forme de ce que j'ai nommé un Processus Opérationnel de Décision (POD).

Ces pathologistes ont mis en œuvre une approche itérative de la conception, mêlant phases de conception et phases d'expérimentation de plein champ. À l'issue de trois itérations (2001, 2003, 2005), ils exprimaient le besoin de formaliser leur démarche.

Il s'agissait donc d'identifier et, si nécessaire, de créer les outils formels et les méthodes qui permettraient aux experts pathologistes d'améliorer le résultat de leur conception en répondant à trois besoins : Pouvoir communiquer le POD à d'autres chercheurs, en tester les aspects opérationnels, et rendre le POD fiable.

Le concept de POD correspond à une approche prescriptive et opérationnelle de la décision, où la protection des cultures est envisagée comme un processus intégré sur l'ensemble de la saison.

Les connaissances permettant de formaliser ce processus ont été recueillies dans le langage Statechart qui est un formalisme à événements discrets.

Les diagrammes Statecharts ont été utilisés comme média entre les experts concepteurs et le cognicien. La méthode de recueil est originale et constitue un résultat de recherche au même titre que le modèle du « POD Mildium » qui en est le produit.

Deux méthodes de validation ont été élaborées pour estimer la qualité du modèle et pointer les défauts de concordance entre les simulations du modèle recueilli et les comportements décisionnels observés. Ce modèle a été validé à partir des données de deux campagnes expérimentales (2005, 2006). On a montré que 85% des décisions étaient similaires.

L'ensemble du travail illustre l'intérêt de l'ingénierie des processus métiers abordée via les statecharts pour raisonner et concevoir des systèmes de protection des cultures.

Abstract

Consumption of phytopharmaceutics by french viticulture is high. Two fungal diseases, powdery mildew and downy mildew make up for 70% of the yearly pesticides spendings for that crop. As they can cause total destruction of the harvest these diseases are seen as pestilences by the growers. As of today, considering the risks, chemical protection is the sole efficient mean of protection.

A Crop Health team (Santé Végétale in Bordeaux) has undertaken since 2001 to solve the difficult task of designing decisional pest management systems for the vineyard. Innovative systems have to demonstrate that, in conformance with Integrated Pest Management (IPM) principles, it is possible to produce high quality grape with a low number of fungicide treatments. The team achieves this by evaluating disease levels plot by plot and by structuring knowledge in what we call a Decision Workflow System (DeWS). The pathologists have adopted an iterative design scheme, interweaving design phases with plot scale experiments. At the end of the third iteration (2001, 2003, 2005) they felt the need for a more formalised approach.

My task consisted in identifying, and, if required, creating the formal tools and methods that would allow the experts to ameliorate their design. The three following needs were stated: to be able to communicate the DeWS, to be able to evaluate its operational aspect, to make the DeWS reliable.

The DeWS concept is a prescriptive approach, making decisions at the operational level, for which crop protection is seen as a process spanning over the whole season.

Knowledge elicitation of the process was carried out using the discrete events system language Statechart.

Statechart Diagrams have been used as the media between the expert designers and the knowledge engineer. This novel knowledge elicitation method is a research result on its own along with the resulting model of the Grapevine powdery and downy Mildew Decision Workflow System (GrapeMilDeWS) (POD Mildium in French).

Two validation methods were designed to evaluate the quality of the elicited model and identify differences of behaviour between decision observed during experiments and model. The model has been validated against the data from two experiments (2005; 2006). It showed 85% decision similarity.

This thesis highlights the advantages of the workflow management Engineering (using Statecharts) to analyse and design crop protection systems.

Remerciements

La chaîne des gens partageant ma responsabilité dans ce document est longue, je n'aurais pas la possibilité d'énumérer tout le monde, par exemple je n'évoquerai pas le maître d'école qui m'a laissé un très mauvais souvenir de mon CE2. Je tiens à remercier mes autres professeurs ceux qui m'ont passionné pour les sciences. Dans ce passé lointain, je voudrais saluer plus particulièrement les enseignants du laboratoire ERIC : Pr. Djamel Zighed, Dr Ricco Rakotomalala, Pr. Nadir Belkhiter et le regretté Pr. Nicolas Nicoloyanis. Chacun d'eux a su me donner confiance et me faire confiance. Je les en remercie.

Je salue également les amis de CMRE, la coopérative agro-informatique qui m'a mis dans le circuit agricole et m'a donné envie de reprendre mes études.

Je voudrais remercier chaleureusement mes rapporteurs, le Dr Françoise Lescourret et le Pr. Michel Combacau d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail. Ce n'est pas facile de jauger un travail pluridisciplinaire comme celui-ci, d'autant que je n'ai pu m'empêcher de commettre un pavé. Encore une fois merci.

Je remercie également le Pr. Cesare Gessler d'avoir fait tout le voyage depuis l'outre jura pour participer à mon jury de thèse.

J'insiste sur mon sentiment de responsabilité partagé, parce que le document que je signe personnellement est aussi le produit d'une collaboration entre informaticiens " mou compatible " et pathologistes sensibles à l'automatique. Mon travail assume et formalise (théorise ?), la production de notre équipe. Nous nous sommes bien entendus, et c'est une collaboration fructueuse qui a été initiée au cours de ma thèse entre les laboratoires Santé Végétale et ITAP.

Dans chacun de ces laboratoires, j'ai été fort bien accueilli et je dois particulièrement remercier Marie Christine Médalin et Michèle Egéa qui ont géré mon cas de co-tutelle avec la plus grande efficacité : je n'ai rien vu, pourtant, je sais que la bureaucratie a exercé son œuvre malveillante. Merci de m'avoir permis de poursuivre mes travaux en toute sérénité.

Je tiens particulièrement à saluer Michel Clerjeau pour la confiance qu'il m'a témoignée et ses enseignements en pathologie végétale. Mais également Philippe Cartolaro et Laurent Delière avec qui j'ai eu la chance de travailler chaque jour à Bordeaux et qui m'ont accordé leur temps sans compter. J'ai appris beaucoup grâce à eux. Ils ont presque réussi à me faire abandonner mon PC pour les champs. Merci de m'avoir transmis votre passion pour votre métier. Merci aussi à Lionel Delbac, à Agnès Calonnec et à Serge Savary pour leurs conseils.

Les personnes avec qui j'ai collaboré à Montpellier doivent également recevoir un très grand coup de chapeau. Merci à Serge Guillaume dont j'ai apprécié la pertinence de ses conseils et de son attention discrète mais suivie.

Merci ! mille fois merci, à Véronique Bellon, dont l'engagement en tant que directrice de thèse a très largement dépassé la moyenne de la discipline. Merci pour ta patience, le temps passé en relecture, en correction et en coups de ciseaux. . .

Merci également et SURTOUT à Olivier Naud, qui a encadré mon travail. Il a su calmer mes angoisses et m'aider à focaliser mes intuitions. Je ne compte même pas le nombre d'heures passées à me donner des conseils et imaginer de nouvelles idées (tu remercieras ta famille pour le temps que je leur ai piqué). Notre collaboration nous a fait

accoucher d'idées dont on peut être fiers et j'espère que nous aurons l'occasion à l'avenir de retravailler ensemble.

Je salue également les thésards et amis bordelais qui m'ont permis de passer une année et demie dans le far west français loin de mes bases arrières, sans jamais me sentir esseulé en pays d'Oc. Quittant le pays de Montaigne pour étudier comme Rabelais à Montpellier, j'ai profité dans cette dernière partie de thèse de la joyeuse galéjade de mon compère Florent a.k.a youpi le ouf Hernandez. Bon courage, pour la suite, mais je ne doute pas que tu auras ton prix Turing avant que je n'ai mon prix ??? Qu'est ce qu'on gagne en agronomie déjà ? En tout cas, merci pour les coups de main lors de la formalisation ensembliste du problème.

Je voudrais terminer en remerciant ma famille. Je dis souvent que je suis un bon fils et que je fais le travail de mes deux pères (informaticien et ingénieur agro). Je remercie donc Paul Saunier dont les contacts dans le monde de la recherche agricole m'ont permis de préparer mon dossier de thèse sereinement ainsi que pour les corrections du manuscrit. Je te remercie aussi pour tout ce qui est venu avant. Et je remercie tout autant Thierry Léger. Tu m'as donné deux conseils infiniment valables : qu'il est possible de recommencer sa vie chaque matin (et pourquoi pas de reprendre ses études ; j'ajoute qu'il convient de ne pas utiliser cette règle tous les matins). Et second conseil, tu m'as expliqué un jour que les workflows sont importants ! C'est ce que je montre dans cette thèse. . .

Quel fils indigne si je ne remerciais pas celle sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Merci pour ton soutien et ta confiance. Merci aussi pour les corrections, ton œuvre de petite main est une contribution importante à la lisibilité de ce document. J'invite donc chacun des lecteurs à prendre un instant pour remercier Bernadette Saunier.

Mais le lecteur doit savoir que la plus grande des petites mains s'appelle Danielle. Merci, pour tes efforts de relecture et de correction (une juriste travaillant en latex c'est très impressionnant...). Merci surtout de tes efforts pour me remonter le moral. Merci aussi pour ta patience et d'avoir supporté le caractère désagréable dont j'ai pu faire preuve. La période de rédaction d'une thèse est un moment difficile, ta présence m'a permis de la surmonter presque allègrement. Merci ! Je vais arrêter, ça va se voir que je te suis infiniment reconnaissant. Allez encore un dernier : merci Danielle.

J'oubliais, merci aux financeurs de cette thèse, l'INRA et le Cemagref

*Comme j'ai bondi l'autre jour en lisant dans l'un des
livres aujourd'hui oubliés de Marie Corelli :*

Donnez nous quelque chose qui dure !

Voilà le cri de l'humanité épuisée.

— HENRY MILLER

Lire au Cabinet (1950)

Introduction

La tenue d'un « Grenelle de l'environnement » à l'automne 2007 et les conclusions du rapport [Paillotin \(2008\)](#) rappellent avec force l'actualité du problème de l'usage intensif des pesticides dans l'agriculture française. Premier consommateur de pesticides en Europe, le secteur agricole français se voit aujourd'hui incité à trouver des solutions permettant de réduire de près de 50% l'usage de pesticides dans un délai de 10 ans si possible (plan EcoPhyto2018).

Trop de pesticides pour la protection du vignoble

Le secteur de la viticulture est particulièrement concerné par cette situation. Avec seulement 3,7% de la Surface Agricole Utile (SAU), la viticulture consomme chaque année 20% des pesticides et 30% des fongicides nationaux. Cette situation est le résultat d'une histoire, qui a vu au cours du XIX^e siècle l'apparition de trois « fléaux » (dans l'ordre : l'Oïdium, le Phylloxera et le Mildiou) introduits en Europe depuis le continent nord Américain. *Vitis vinifera*, la vigne européenne, s'est alors trouvée incapable de développer une réponse immunitaire satisfaisante, n'étant génétiquement pas équipée pour repousser ces nouveaux bio-agresseurs. La législation française aggrave encore cette situation lorsque, pour améliorer la qualité, elle interdit le recours à l'hybridation et ne laisse ainsi aux viticulteurs français que la réponse chimique pour protéger leur production.

Aujourd'hui, si le phylloxera n'est plus un problème depuis la généralisation du greffage, l'oïdium et le mildiou représentent encore à ce jour 70% des dépenses de fongicides du secteur. La viticulture a encore globalement une *approche préventive* de la protection du vignoble avec en moyenne dans le Bordelais ≈ 7 traitements anti-mildiou par an et 6 traitements anti-oïdium.^a

Besoin de solutions innovantes pour la réduction des intrants

C'est pour faire évoluer ces pratiques en proposant une approche alternative du contrôle des épidémies qu'en 2001 l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Santé Végétale a initié une réflexion et des travaux au cours de l'action thématique de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) : « Action PIC ».

Cette démarche est basée sur les principes de la Protection Intégrée des Cultures (PIC). Apparue au début des années 1960 en réponse aux ravages de l'agriculture productiviste (notamment du DDT, cf. [Carson, 1962](#)), la PIC, en anglais IPM, propose une gestion durable de l'agro écosystème en visant à réguler les populations d'espèces nuisibles (animaux, insectes, mauvaises herbes, champignons) et à les maintenir à des niveaux compatibles avec une exploitation rentable des terres. Si la recherche des équilibres naturels est l'objectif visé, la PIC autorise le recours aux pesticides et fongicides issus de la chimie de synthèse quand aucune solution alternative ne permet d'assurer le revenu de

a. Enquête menée par l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Santé Végétale (SV) et moi même dans le cadre du projet Vin et Environnement (ADD-Vin) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) (programme Agriculture et Développement Durable (ADD)) - Résultats détaillés en annexe A. L'enquête vise à caractériser les pratiques des viticulteurs bordelais en matière de traitements phytosanitaires.

l'agriculteur.

La viticulture se trouve dans ce dernier cas de figure. En l'absence de solution *via* la sélection variétale, l'hybridation, ou le contrôle biologique, le viticulteur est techniquement forcé d'avoir recours aux méthodes de protection chimique (chimie organique de synthèse ou cuivre et soufre naturels). Les chercheurs de Santé Végétale ont considéré qu'en mobilisant leur expertise scientifique et leur expertise technique, il était possible de réduire l'usage des pesticides. Dans la démarche du laboratoire, l'usage intensif de l'information est substitué à l'usage intensif de pesticides, et permet de produire du raisin dans des conditions économiquement viables. Selon Bazoche et al. (2008), les Règles De Décision Agronomique (RDD) proposées par Santé Végétale, pourront dans les années à venir servir de base à l'évolution des pratiques viticoles et permettront à la filière d'atteindre, au moins en partie, les objectifs énoncés dans le plan Ecophyto2018.

Ces Règles de Décision (RDD) ont été mise en œuvre sur les domaines viticoles de l'INRA de Bordeaux et de Montpellier avec des résultats agronomiques satisfaisants. Néanmoins, l'expérimentation a montré ses limites (ambiguïté du protocole, hétérogénéité des résultats) en l'absence de formalisation. Ma thèse menée dans le cadre d'une collaboration UMR Santé Végétale/UMR Information et Technologie pour les Agro Procédés (ITAP) (Montpellier SupAgro/CEMAGREF) a donc été initiée pour aborder les verrous scientifiques de la formalisation des RDD.

Problématique

L'équipe de Santé Végétale a entrepris en 2001 de résoudre le problème difficile de la conception et de la mise au point de systèmes de décision en PIC. Au cours de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur le cas du contrôle combiné du mildiou et de l'oïdium.

La démarche contre l'oïdium et le mildiou a consisté à produire un cadre décisionnel normatif et générique permettant de réaliser les objectifs de production en utilisant un nombre réduit de traitements phytosanitaires pour y parvenir. Le processus de décision (on préfère la notion de Processus Opérationnel de Décision ou POD à celle de Règle De Décision) vise, par une organisation précise de la saison, à piloter les décisions, que ce soit le choix des moments d'observation ou le choix d'application des traitements. Le caractère normatif du POD est proposé à l'agriculteur pour compenser, par une procédure structurée et expérimentée, la prise de risque que le nombre réduit de traitements impose. Au-delà du cas particulier de ce pathosystème, mon travail a mis en évidence l'intérêt méthodologique de l'approche « processus » pour la conception d'outils de protection des cultures.

Les pathologistes ont mis en œuvre une approche itérative de la conception, mêlant phases de conception et phases d'expérimentation de plein champ. A l'issue de trois itérations (2001, 2003, 2005) ils exprimaient trois demandes : *Pouvoir communiquer* le POD à d'autres chercheurs, en *tester les aspects opérationnels*, et *rendre le POD fiable*. L'écriture du POD dans un formalisme logico-mathématique semblait pouvoir répondre à ces besoins.

Il s'agissait donc pour moi d'identifier et, si nécessaire, de créer les outils formels et les méthodes qui permettent aux experts de concevoir un modèle de décision en répondant à leurs trois besoins.

Plus précisément, la question scientifique sur laquelle j'ai travaillé s'énonce de la manière suivante :

Comment le formalisme graphique Statechart peut-il contribuer à la conception d'un procédé de décision innovant issu d'une expertise collective et visant à gérer un ou plusieurs phénomènes mal connus, dans le cadre d'une activité de production complexe, soumise aux influences d'un environnement non contrôlé, et dans laquelle les séquences et les moments de décisions jouent un rôle déterminant ?

Plan du manuscrit

Comme indiqué dans la problématique, on a considéré la prise de la décision tactique en protection des cultures vue comme un *processus*. Le *raisonnement tactique des applications phytosanitaires* est dès lors étudié comme un tout coordonné au cours de la saison. L'approche processus permet ainsi de raisonner la protection phytosanitaire dans le cadre de l'organisation globale des activités de l'agriculteur. Le chapitre 1 présente les attendus en protection des cultures et développe en conclusion les arguments en faveur de ce paradigme.

Nous nous sommes placés dans le cadre mathématique des systèmes à événements discrets pour la modélisation du procédé. Le chapitre 2 présente notre analyse du problème en termes d'automatique et les choix possibles parmi les formalismes SED à notre disposition. Nous avons opté pour le langage graphique des Statecharts (Harel, 1987), pour lequel de nombreux outils de développement sont disponibles pour modéliser et exécuter les modèles en simulation.

L'étude de l'exploitation agricole d'un point de vue processus se répand en agronomie dans le cadre de la conception de systèmes de conduite, mais est originale, à notre connaissance, dans le domaine de la protection des cultures. Le chapitre 3 interroge le parti pris « processus » pour modéliser la décision dans l'entreprise agricole, autour des théories du modèle d'action et de la modélisation des *processus métiers* (workflow) en informatique. L'approche POD est présentée et discutée au regard de ces théories. Ce chapitre clôt l'analyse de l'état de l'art.

Dans le chapitre 4, on montre l'intérêt du langage Statechart pour le recueil de connaissances, via l'élaboration d'une méthode originale de recueil d'expertise qui utilise le diagramme Statechart comme intermédiation entre un ou plusieurs experts et le modélisateur.

Le modèle formel issu du recueil de connaissances donne aujourd'hui aux experts concepteurs la possibilité de travailler en toute intelligibilité avec les responsables du développement aussi bien qu'avec des informaticiens. La modélisation a permis d'objectiver la connaissance et d'en travailler la cohérence et l'exhaustivité. En cela, le recueil de connaissances fait partie du travail de conception. Le chapitre 5 présente le modèle produit et en questionne la forme.

Au chapitre 6, on montre que le modèle formel a pu être implanté directement dans un simulateur et *validé par comparaison aux décisions prises par les experts concepteurs* au cours d'expérimentations de plein champ.

Mené en l'absence de modèle biotechnique permettant de simuler l'évolution des épidémies, ce travail de validation du modèle permet de souligner l'intérêt qu'il y a à travailler sur les séquences de décision et la qualité de conception des processus étudiés.

L'utilisation d'outils complémentaires de vérification automatique fait partie des perspectives que nous développons en conclusion (chap. 7). Celle-ci sera également l'occasion de montrer l'intérêt de notre méthode dans d'autres domaines où les procédés experts doivent être représentés.

La figure 0.1 résume la proposition qui est faite dans cette thèse d'intégrer les méthodes de modélisation formelle dans la conception itérative de procédés experts.

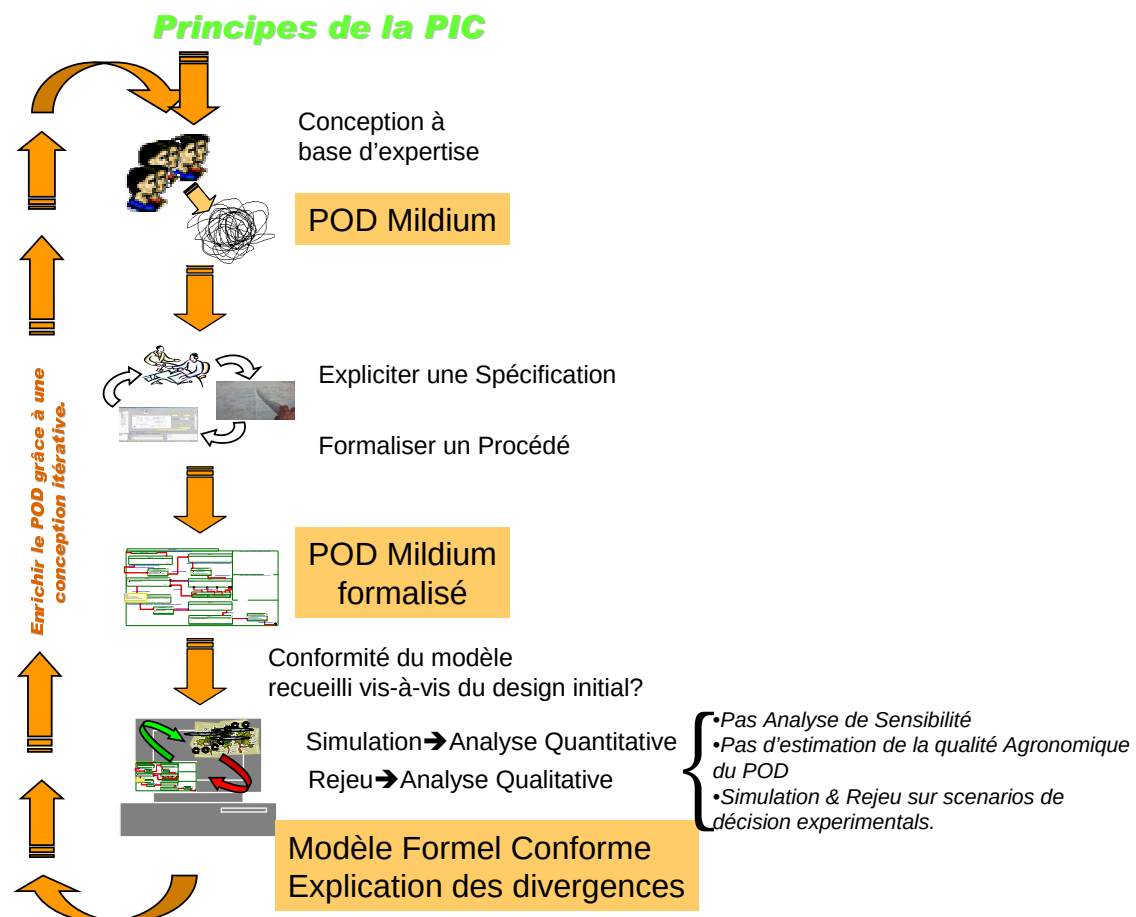


FIGURE 0.1 – Outils d'aide à la conception de procédés à base d'expertise dans une démarche itérative.

Remarque : Les chapitres de présentation du contexte et de bibliographie (chapitre 1 à 3) sont présentés suivant une structure classique. Les chapitres présentant les propositions méthodologiques et les résultats obtenus, qui constituent le coeur de ma thèse, sont présentés au travers des articles rédigés sur chacun des points d'intérêt.

Chapitre 1

Contexte de la protection du vignoble

Contents

1.1	La pratique phytosanitaire viticole française	10
1.1.1	Contexte économique	10
1.1.2	Historique	10
1.1.3	Situation actuelle	11
1.2	La protection intégrée des cultures	15
1.2.1	Le concept général de la protection intégrée des cultures	15
1.2.1.1	Une approche marginaliste	15
1.2.1.2	Nuisibilité	16
1.2.1.3	La protection intégrée des cultures est un processus dynamique	18
1.2.2	La protection intégrée du vignoble	20
1.2.2.1	Le cas des maladies cryptogamiques	20
1.2.2.2	Quelle pratique de la protection intégrée en viticulture	22
1.3	Les maladies cryptogamiques de la vigne	23
1.3.1	Éléments de pathologie végétale	23
1.3.2	L'Oïdium de la vigne	24
1.3.2.1	Description du pathogène :	24
1.3.2.2	Epidémiologie	26
1.3.3	Le mildiou de la vigne	28
1.3.3.1	Description du pathogène :	28
1.3.3.2	Epidémiologie	30
1.4	Les travaux de l'UMR Santé Végétale - INRA Bordeaux	34
1.4.1	Historique de l'action PIC vigne	34
1.4.2	Concevoir des Règles De Décision innovantes en Protection Intégrée des Cultures	35
1.5	Conclusion : le besoin d'un formalisme	36
1.5.1	Approche et gestion de l'expertise	37
1.5.2	Formalisation de procédés	37

[...] *l'entreprise de détermination et de justification de quelques méthodes guidant la conception et la construction de représentations formelles (des modèles) de phénomènes, projets ou objets que l'on perçoit complexes et donc non réductibles a priori à une hypothétique explication [...]*

— LEMOIGNE

Encyclopedia Universalis (1993)

Ce chapitre présente le contexte professionnel et le contexte de production dans lesquels s'est déroulée cette thèse. Il positionne notre problématique dans ce contexte.

Dans un premier temps, nous aborderons les pratiques phytosanitaires des viticulteurs français, et nous introduirons quelques éléments de pathologie végétale notamment, le cycle épidémique des agents pathogènes étudiés (*Plasmopara viticola* et *Erysiphe necator*). Nous aborderons, ensuite, les principaux concepts de la Protection Intégrée des Cultures (PIC), étudiés dans un cadre général puis dans celui de la viticulture.

Dans un second temps, nous exposerons les travaux en cours au sein de l'UMR SV de l'INRA de Bordeaux, qui justifient cette thèse. Enfin, nous concluons ce chapitre avec la présentation de notre problématique de thèse.

1.1 La pratique phytosanitaire viticole française

On ne saurait présenter les pratiques phytosanitaires sans faire un constat de l'impact économique et environnemental de la protection du vignoble.

1.1.1 Contexte économique

La viticulture française est un secteur encore très consommateur de produits phytosanitaires. Aubertot et al. (2005) ont quantifié cette situation :

[Elle] tient moins à l'importance des surfaces cultivées (0.860 Mha soit seulement 3,7 % de la [SAU]) (Onivins, 2003), qu'au nombre de traitements phytosanitaires réalisés [. . .] Ces traitements sont considérés comme la solution quasi-unique contre le cortège de bio-agresseurs [voir def.2] de la culture.

Si l'on comptabilise le nombre moyen d'applications visant chaque bio-agresseur (enquêtes BVA réalisées annuellement pour les firmes), une vingtaine de traitements sont appliqués annuellement. Il s'agit majoritairement de pulvérisations de fongicides (360 €/ha) visant essentiellement deux maladies : l'oïdium et le mildiou qui, à elles seules, génèrent 70% des dépenses phytosanitaires. Les insecticides et les herbicides représentent respectivement 130 et 150 € de dépenses. Ainsi la vigne utilise t-elle environ 20% des intrants pesticides nationaux dont 30% des fongicides. Il en résulte, pour les exploitations, des coûts [. . .] représentant la moitié de leurs charges d'approvisionnement. D'importantes disparités sont toutefois constatées autour de ces moyennes selon les exploitations (ASK, 2000).

in : Aubertot et al. (2005, Ch.4)

Cherchons à présent dans l'histoire de la viticulture des raisons pouvant expliquer ces consommations.

1.1.2 Historique

On citera à nouveau Aubertot et al. (2005) pour leur synthèse du contexte historique de la protection du vignoble :

[La situation actuelle] est le fruit d'une suite d'événements historiques majeurs qui ont profondément marqué la viticulture depuis le 19^e siècle, no-

tamment l'introduction, depuis les États-Unis, de plusieurs fléaux destructeurs : l'oïdium en 1848 (chute des récoltes de 75% en 3 ans), le Phylloxéra en 1863 (arrachage de tous les vignobles et reconstitution par de nouveaux cépages sur de nouveaux terroirs), le mildiou en 1878 (recherches intensives ayant conduit à la découverte de la bouillie bordelaise en 1885), enfin le Black-rot en 1885 (Galet, 1977). Une issue à ces crises a été rendue possible grâce au greffage de la vigne sur des porte-greffes résistants au Phylloxera et grâce aux premiers produits fongicides que sont le soufre et le sulfate de cuivre. Pour s'en affranchir, des hybrides résistants, dits producteurs directs, ont également été cultivés jusqu'au milieu des années 1950. Ils ont été interdits réglementairement en 1953 (décret 53.977 du 30 septembre) pour cause d'insuffisance qualitative face aux évolutions prévisibles de la demande des consommateurs. Il faut souligner ici ce qui pourrait être considéré comme une incongruité aujourd'hui : au milieu du 20^e siècle, les pesticides étaient jugés comme des facteurs de durabilité de la culture et la résistance variétale comme un facteur de non durabilité pour cause d'impasse commerciale.

in : Aubertot et al. (2005, Ch.4)

1.1.3 Situation actuelle

On l'a vu, la viticulture reste fortement consommatrice de produits phytosanitaires. Cela tient à des raisons quantitatives, du fait des risques de pertes engendrées par les pathogènes mais aussi à des choix stratégiques antérieurs qui ont résolument orienté la filière vers le « tout chimique » pour des raisons qualitatives.

L'utilisation massive de fongicides (notamment) n'est certes pas une spécificité de la viticulture, et se retrouve largement dans les cultures à haute valeur ajoutée (par exemple arboriculture, cultures légumières). Si une pomme touchée par la tavelure (*Venturia inaequalis*) peut être considérée comme non commercialisable, il n'en est pas de même pour le raisin destiné à la vinification puisque certains taux de dégâts peuvent être tolérés sans constituer de défauts gustatifs dans le vin (jusqu'à 5% de baies oïdiées peuvent être tolérées à la récolte selon Calonnec et al., 2004; Darriet et al., 2002). Cependant la préservation de l'aspect sanitaire et qualitatif est souvent évoquée pour expliquer les pratiques actuelles. C'est donc toute la filière qui doit travailler à changer ses représentations pour adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement : de la pépinière aux consommateurs en passant par l'œnologue et le politique.

C'est cette transformation qui est entreprise depuis le tournant du siècle avec l'introduction du référentiel Agriculture Raisonnée (MinAgri, 2002) et les différents labels commerciaux qui visent à le valoriser (par exemple charte Terra Vitis, Filière Qualité Carrefour, etc.). Jusqu'à présent ces initiatives ne sont pas particulièrement connotées positivement par les consommateurs, qui valorisent davantage le label agriculture biologique (Bazoche et al., 2008).

On constate cependant que l'agriculture biologique est proche de l'impasse technique, dans la mesure où les principaux outils, dont elle dispose pour la protection, hors mesures culturales à effet préventif partiel, se limitent à la bouillie bordelaise contre le mildiou et à l'emploi du soufre contre l'oïdium. Il existe peu de spécialités alternatives sur le marché qui respectent le cahier des charges de l'agriculture biologique et offrent les

niveaux de protection suffisants. Nous reviendrons sur les perspectives de lutte alternative à la chimie de synthèse lorsque nous aborderons la protection intégrée du vignoble. Au-delà de la situation de la seule agriculture biologique, c'est tout le panel de choix techniques pour la protection du vignoble qui tend à se réduire du fait des contraintes croissantes imposées par les procédures d'homologation européennes et nationales, en raison notamment du renforcement des exigences en terme de toxicité et d'éco-toxicité des pesticides (UE, 1991).

Par exemple, l'interdiction de l'arsénite de soude en 2001, pour cause de très grande toxicité pour l'homme, a entraîné depuis une recrudescence de maladies de dépérissement (ou maladies du bois), tel l'Esca, que ce produit était le seul à combattre efficacement.

A l'heure actuelle, il n'y a pas encore de solution contre ces maladies qui touchent à la pérennité même de l'outil de production des viticulteurs. Là où mildiou (*Plasmopara viticola*), oïdium (*Erysiphe necator*) et pourriture grise (*Botrytis cinerea*), principales causes de perte de récoltes, posent des risques de perte ponctuelle, les nouveaux risques (les maladies du bois déjà évoquées ou l'épidémie de flavescence dorée causée par un phytoplasme dont le vecteur est une cicadelle (*Scaphoïdus titanus*)) entraînent la mort du cep.

Ainsi, en région bordelaise, les maladies du bois et la flavescence dorée sont elles particulièrement redoutées comme le montrent les résultats de l'étude sur la pratique sanitaire en bordelais que nous avons réalisé dans le cadre du projet [ADD-Vin](#) de l'ANR (programme [ADD](#)).

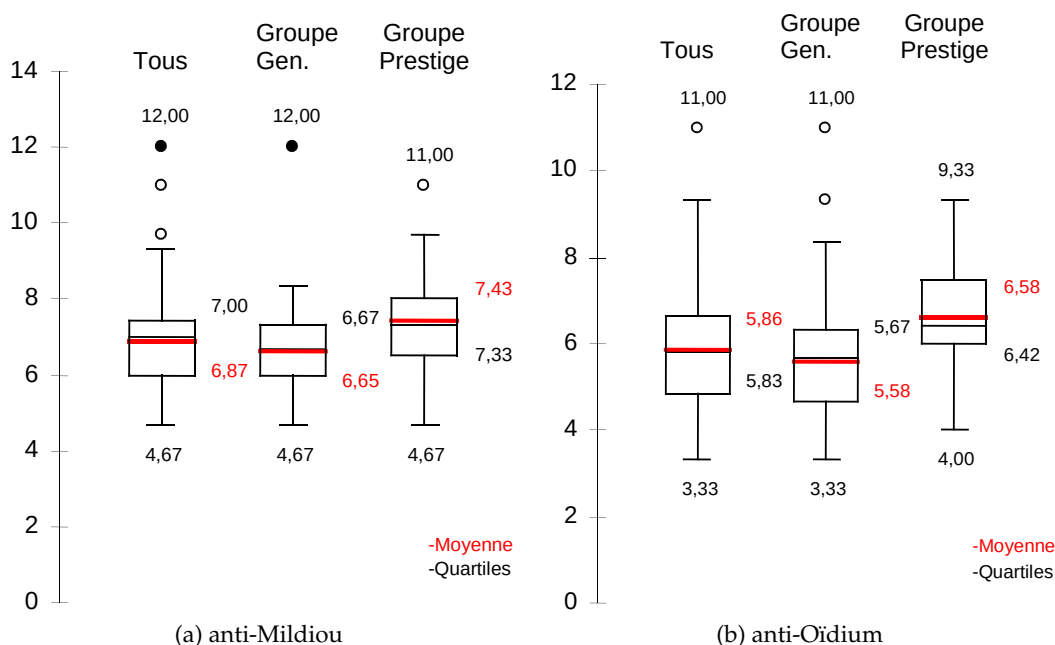


FIGURE 1.1 – Boîte de Tuckey du nombre annuel moyen de traitements (années 2004, 2005, 2006) sur un échantillon de 100 exploitations bordelaises). « Groupe Gen. » renvoie aux appellations vin Bordeaux générique et « Groupe Prestige » aux appellations haut de gamme, voir la caractérisation de chaque groupe tab. 1.1

Une synthèse détaillée de cette enquête est disponible en annexe [A.1](#). Les principaux résultats sont résumés dans la table [1.1](#). L'enseignement principal de cette enquête est que la découverte des déterminants du nombre de traitements est très complexe. A partir de nos données, le seul critère qui a pu être mis en évidence pour expliquer une différence dans le nombre moyen de traitements anti mildiou et anti oïdium/exploitation (moyenne de 2004 à 2006), serait le prestige de l'appellation. Notre enquête fait en effet apparaître que dans les appellations les plus prestigieuses, il y aurait en moyenne 0,82 traitement anti mildiou et 1,00 traitement anti oïdium de plus par an que dans l'ensemble de la population (voir fig. [1.1](#)). Cette différence ne doit pas laisser penser que le nombre de traitements joue sur la qualité du produit fini. Les experts sont capables de produire du raisin de qualité avec bien moins de traitements. Les pratiques fortement consommatrices d'intrants relèveraient plus de la stratégie d'assurance que d'une nécessité thérapeutique ([Clerjeau and Soler, 2006](#)). On peut même ajouter que la haute qualité des vins issus d'appellations prestigieuses est obtenue notamment par des opérations culturales comme l'ébourgeonnage ou l'effeuillage dont les effets bénéfiques pour la qualité des raisins sont complétés par des effets prophylactiques ([Fermaud et al., 2001](#)) qui à l'heure actuelle ne sont pas ou peu pris en compte dans la construction de la stratégie phytosanitaire.

On peut s'interroger sur les raisons qui font que la prophylaxie considérée comme une technique importante dans le cadre de la [PIC](#) soit aussi peu mise à profit pour réduire l'usage des traitements phytosanitaires.

	Groupe Prestige	Groupe Générique
Caractéristiques	Appellations prestigieuses, grandes exploitations, gérées par des chefs de culture	Appellations génériques, exploitations de petite ou moyenne taille, gérées par le propriétaire, souvent coopérateur
Contexte agronomique	Effeuvillage et ébourgeonnage, vendanges à la main, grand soin apporté au levage	Aucune intervention en vert ou effeuillage seulement, vendanges mécanisées
Informations mobilisées	Le coût du produit n'est pas un critère orientant le choix	Le coût du produit est un critère orientant le choix
Nombre de traitements mildiou et oïdium	Supérieur à la moyenne de l'échantillon	Inférieur à la moyenne de l'échantillon

TABLE 1.1 – Synthèse de l'étude des pratiques phytosanitaires en bordelais.

1.2 La protection intégrée des cultures

Le concept de Contrôle Intégré date de 1952. Il a peu à peu évolué vers la notion actuelle de PIC ou en anglais IPM. Parmi les nombreuses définitions de l'IPM, Kogan (1998) en compte 64, nous privilégierons celle de la FAO-UNEP (1974)

Définition 1. *La protection intégrée est un système de gestion des bio-agresseurs qui, dans le contexte de l'environnement associé et de la dynamique des populations des espèces de bio-agresseurs, utilise toutes les techniques et méthodes adéquates d'une manière aussi compatible que possible et maintient les populations de bio-agresseurs à des niveaux en dessous de ceux causant des dégâts économiques. Dans un sens plus restreint, elle fait référence à la gestion d'une unique espèce de bio-agresseurs sur des cultures spécifiques ou dans des lieux particuliers. Plus généralement, elle s'applique à la gestion coordonnée de toutes les populations de bio-agresseurs de l'environnement agricole ou forestier. Ce n'est pas seulement la juxtaposition ou la superposition de deux techniques [...] mais l'intégration de toutes les techniques de gestion avec la régulation naturelle et les éléments limitants de l'environnement.*

in : FAO-UNEP (1974, in Kogan 1998)

De manière synthétique, Kogan (1998) précise :

Les auteurs ont tenté de saisir l'essence du concept selon les termes suivants : (a) le choix approprié des méthodes de contrôle des bio-agresseurs utilisées seules ou en combinaison ; (b) les bénéfices économiques pour l'agriculteur et la société ; (c) les règles de décision qui guident le choix de l'action de contrôle ; et (d) le besoin de prendre en considération l'impact de multiples agresseurs.

in : Kogan (1998)

La littérature portant sur le sujet de la PIC est trop vaste pour pouvoir être présentée ici. Le lecteur pourra par exemple se référer à Kogan (1998); Dent (1995).

1.2.1 Le concept général de la protection intégrée des cultures

1.2.1.1 Une approche marginaliste

Le constat de base à l'origine de l'élaboration du concept de contrôle intégré est la prise de conscience que la stratégie d'éradication des populations nuisibles aux cultures (insectes, champignons, adventices), basée sur la lutte chimique et la sélection des cultivars résistants associées aux systèmes de cultures productivistes, était non seulement non durable (Brundtland, 1987) mais en outre produisait de nouvelles nuisances. Le caractère non durable s'illustre dans les pollutions causées par les pesticides à large spectre^a et à longue durée d'action (concentration du DDT et/ou baisse de la biodiversité Carson, 1962) mais également par l'utilisation non raisonnée de pesticides spécifiques en combinaison avec des systèmes de cultures productivistes (choix variétaux) favorisant l'apparition de souches résistantes, de pollutions de l'environnement (externalités négatives) ou des réductions de la biodiversité (perte par diminution des externalités positives).

a. Les pesticides à large spectre ont un mode d'action qui touche des fonctions codées par plusieurs gènes et sont souvent actifs sur plusieurs espèces.

A cette stratégie d'éradication des nuisances qui s'est avérée inefficace à long terme, la communauté des entomologistes d'abord et celle des phytopathologistes ensuite a substitué comme paradigme dominant *l'approche intégrée*^b qui nous semble être inspirée de l'utilitarisme et du marginalisme tels que la doctrine de Pareto l'exprime. En effet, dans le contexte de la PIC, l'objectif de l'agriculteur, conformément à la théorie économique dominante, est de maximiser son profit monétaire sous contrainte de minimiser les externalités négatives (par exemple le risque d'apparition de résistances suite à une sur-utilisation d'un type de molécule) et de maximiser les externalités positives (prise en compte des insectes utiles comme auxiliaires dans la protection des cultures).

1.2.1.2 Nuisibilité

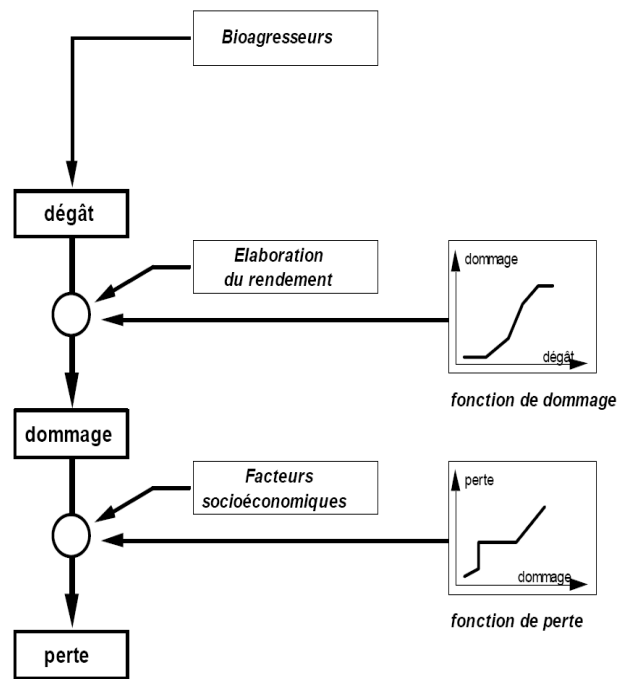
La définition 1 faisait allusion aux seuils de dégâts économiques comme la notion centrale de la PIC. En effet, l'approche moderne de la protection des cultures fait des distinctions fortes parmi les nuisances causées par un bio-agresseur. La figure 1.2 montre comment, d'une espèce (le bio-agresseur) causant des *dégâts* à la culture (c'est à dire une perturbation du système végétatif ou racinaire de la plante), on passe à la notion de *dommages* dès lors que ces dégâts entraînent des pertes quantitatives et/ou qualitatives de récoltes. Pour autant, les dommages ne sont pas nécessairement cause de pertes économiques. Trois facteurs principaux sont susceptibles de jouer sur ces pertes : les coûts de production, la valorisation des produits de la culture et la quantité de dommages.

Ce triptyque engage des choix d'ordre stratégique à long terme, à moyen terme et des choix tactiques en cours de saison (Savary et al., 2006). Les décisions stratégiques de long terme concernent le choix du type de culture, le choix du système de culture pour les plantations pérennes ou le niveau d'investissement de l'exploitation. Ces choix vont influencer de manière durable l'intensité capitalistique de la production, les perspectives de profits mais également la sensibilité et la résilience de l'exploitation aux risques de pertes induites par les épidémies.

Des choix stratégiques de moyen terme (choix pluri à inter-annuels), comme le choix des variétés plantées, influencent également le niveau de pertes économiques. Meynard et al. (2003) montrent comment le choix variétal permet de piloter le nombre de traitements à appliquer contre les principales maladies du blé. Ces auteurs montrent également que ce choix permet de piloter le revenu potentiel selon qu'on préfère une variété productive ou une variété résistante. En caricaturant une vision à court terme, ce serait le prix du marché du blé qui conditionnerait la mise en œuvre de la stratégie à faibles intrants puisque, quand les prix montent, les choix variétaux les moins productifs entraînent des pertes d'opportunités.

En fait, l'adoption d'une approche PIC est un choix politique qui implique l'adhésion de l'agriculteur aux valeurs de préservation de l'environnement et de durabilité du système productif, comme le précise la Directive de l'Organisation Internationale de Lutte Biologique et Intégrée (OILB) pour la Production Intégrée (PI) des raisins (voir encadré 1 p.19 et Malavolta and Boller, 1999)

b. Ce changement de paradigme participe également de la prise de conscience citoyenne, écologiste et consumériste des années 1960 (par exemple Nader, 1965).



source : (Savary, 1991, in Aubertot et al. 2005)

FIGURE 1.2 – Relation entre bio-agresseurs (et leurs dynamiques), dégâts (visibles et mesurables dans le peuplement), dommages (pertes de récolte) et pertes (pertes économiques). La transition entre dégâts et dommages dépend d'une part du processus d'élaboration du rendement et d'une fonction de dommage ; la relation entre dommages et pertes dépend d'une part de facteurs socio-économiques et d'une fonction de perte (Savary, 1991, in Aubertot et al. 2005)

Dans une exploitation agricole, les facteurs épidémiologiques, tels que le type de cycle du bio-agresseur (monocyclique ou polycyclique voir fig. 1.3) et le degré de polyétisme des épidémies (voir section 1.3.1) influencent les choix stratégiques de long terme comme les choix tactiques. Un bio-agresseur dont les populations ont des dynamiques fortement polyétiques et polycycliques (comme le mildiou et l'oïdium de la vigne) laisse présager, dès l'implantation de la culture, de forts investissements annuels en protection, que seule une forte rentabilité peut justifier. Shtienberg (2000) montre l'influence de la valorisation économique des cultures sur la gestion des bio-agresseurs et indique que les maladies les plus destructrices s'observent principalement dans les cultures à forte valeur ajoutée (V.A.), dans la mesure où les cultures à faible V.A. ne restent rentables que si les épidémies qui les touchent sont bénignes.

Pour ce qui est des décisions tactiques, cet auteur met l'accent sur une surveillance au champ pour les maladies peu destructrices sur culture à faible V.A. Les risques de pertes étant limités, cela permet d'éviter les traitements inutiles et permettrait d'adapter au mieux la protection aux situations locales. Pour les cultures à forte V.A. confrontées à des bio-agresseurs « destructeurs », une modélisation épidémiologique et des systèmes de prévisions seraient à favoriser. En effet, les risques de pertes paraissent trop grands pour que la seule observation des cultures, associée à des seuils de décision, permette de protéger convenablement la culture. L'observation de symptômes serait, selon l'auteur,

trop tardive pour que le contrôle puisse être efficace.

Cette argumentation permet de comprendre comment la forte valorisation de la viticulture en région bordelaise rend supportable les coûts de protection induits par les risques de pertes majeures que font encourir l'oïdium, le mildiou et la pourriture grise, du fait de leurs caractères à la fois explosifs (polycyclisme) et systématiques (polyétisme). L'analyse de Shtienberg explique les pratiques actuelles y compris celles de la viticulture raisonnée (MinAgri, 2002) (usage préventif de systèmes de prévisions des risques). Pourtant, ce modèle de production devra sans doute être remis en cause si la filière souhaite parvenir aux objectifs de 50% de réduction des intrants à l'horizon 2018.

1.2.1.3 La protection intégrée des cultures est un processus dynamique

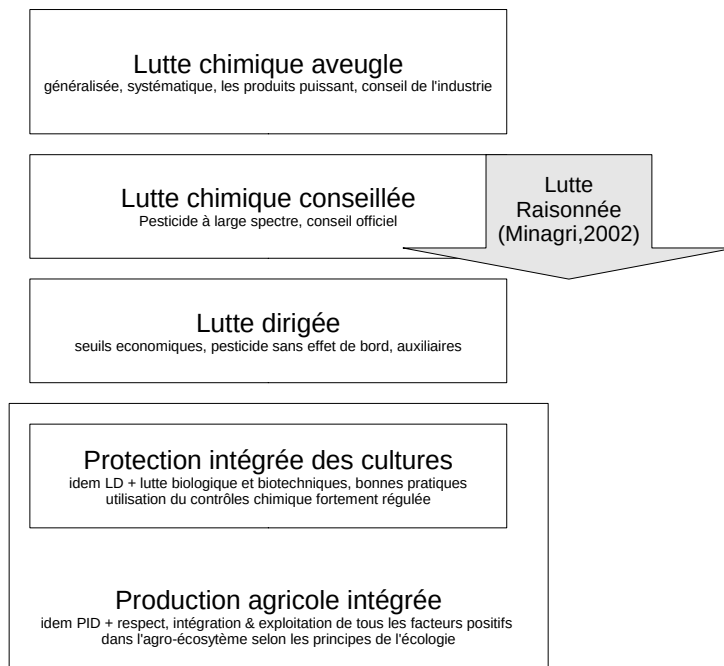
La protection intégrée des cultures ne se résume pas à un arbitrage économique entre des opportunités de gains et des possibilités de réduction des coûts de production. C'est surtout, pour chaque culture, une démarche à long terme dans laquelle s'engage tout d'abord la communauté scientifique, puis, progressivement la filière, qui se structure pour permettre *in fine* aux agriculteurs de mettre en œuvre des stratégies PIC (Gotsch and Braunschweig, 1999; Dent, 1995).

La démarche PIC vise à faire une utilisation intensive de la connaissance d'un milieu et permet de proposer des solutions innovantes pour la gestion de bio-agresseurs : il peut s'agir de la mise au point de nouveaux pesticides biologiques, de produits éliciteurs des défenses naturelles des plantes, de la recherche d'espèces auxiliaires ou de la mise en place de nouveaux systèmes de cultures, d'outils de gestion des équilibres de l'écosystème ou encore d'Outil d'Aide à la Décision (OAD) (Bouma, 2007), qui établissent des seuils d'interventions ou mobilisent des modèles de prévision des risques.

Dans ses directives pour la Protection Intégrée (PI) (Boller et al., 2004), l'OILB précise que la Protection Intégrée des Cultures doit être comprise comme une hiérarchie de priorités dans le choix des méthodes à la disposition de l'agriculteur (voir tab. 1.2). L'accent est mis en priorité sur la *prophylaxie* et toutes les méthodes permettant à l'agro-écosystème de s'auto-réguler. La *surveillance* directe et/ou l'emploi de *modèles de prévision* des dates d'occurrence et/ou des risques doivent être menés en parallèle à cette prophylaxie. Associée à des *fonctions de pertes* économiques, cette surveillance permet de détecter les situations mettant en danger les revenus de l'exploitation et de prendre des mesures de *protection directe*. Là encore, l'OILB recommande une réponse graduée, allant de la lutte biologique sélective (tab. 1.2-4) à l'application d'une protection à large spectre, la moins nocive possible (tab. 1.2-5).

Kogan (1998) évoque dans sa revue l'intérêt de la dimension spatiale. Le raisonnement spatial intégré débute au niveau parcellaire avec des préconisations comme l'enherbement des inter-rangs en viticulture, pour se poursuivre à l'échelle de l'exploitation avec des mesures telles que l'attribution de 5% des terres agricoles réservées à des zones de préservation (Boller et al., 2004; MinAgri, 2002) ou la constitution de haies permettant le développement d'insectes auxiliaires par exemple (van Helden et al., 2006). Des travaux sont également menés à une échelle encore plus grande pour raisonner les épidémies et leurs contrôles au-delà de l'exploitation. Si les modèles de risques épidémiques sont souvent conçus pour être pertinents à l'échelle de la petite région, l'organisation et la coordination de politiques de prévention des risques épidémiques, restent en 2008

Les étapes de la protection des cultures



d'après Boller et al. (1998); MinAgri (2002)

Définition de la Production Intégrée selon l'OILB version courte

La Production/Agriculture Intégrée est un système d'exploitation agricole qui produit de la nourriture et d'autres produits de haute qualité utilisant les ressources naturelles et les mécanismes de régulation pour remplacer les intrants polluants et pour assurer une agriculture durable.

L'accent est mis sur :

- *une approche holiste des systèmes impliquant l'ensemble de l'exploitation comme unité de base,*
- *le rôle central des agro-écosystèmes,*
- *l'équilibre des cycles nutritifs, et*
- *sur le bien être de toutes les espèces d'élevage.*

La préservation et l'amélioration de la fertilité du sol, d'un environnement diversifié et l'observation de critères éthiques et sociaux en sont des composantes essentielles.

Les méthodes biologiques, techniques et chimiques sont soigneusement équilibrées en tenant compte de la protection de l'environnement, de la rentabilité et des besoins sociaux.

in : Boller et al. (2004, p.4)

Encadré 1 – La Production Intégrée résumée

une question de recherche.

1.2.2 La protection intégrée du vignoble

La Protection Intégrée des Cultures en viticulture connaît un développement inégal. Les possibilités sont en effet fortement restreintes dans la mesure où le recours à l'hybridation ou au génie génétique (Organisme Génétiquement Modifié ou OGM) sont à l'heure actuelle exclus par la législation. Il n'y a donc à ce jour pas de solution pérenne permettant de conférer une résistance exploitable à *Vitis vinifera*.

On constate néanmoins que dans le cas des ravageurs des solutions existent. Comme l'a dit Clerjeau dans (Aubertot et al., 2005) :

[...] si l'on exclut l'impasse que constitue le problème du phytoplasme de la [Flavescence dorée (FD)], nous disposons aujourd'hui des outils permettant de protéger la vigne contre les ravageurs sans faire appel aux insecticides.[...]

in : Aubertot et al. (2005, chap.4 p.82)

1.2.2.1 Le cas des maladies cryptogamiques

Cependant, pour les maladies cryptogamiques, la protection intégrée s'avère plus complexe. Les bonnes pratiques préconisent différentes mesures de prophylaxie visant principalement à réduire la vigueur notamment l'enherbement dont l'effet préventif contre *B. cinerea* est démontré (Fermaud et al., 2001), mais aucune étude ne quantifie les effets de ces pratiques qui sont généralement mises en œuvre pour des raisons qualitatives.

En terme de lutte biologique, peu de solutions sont commercialisées en France. Il s'agit principalement d'extraits végétaux à l'efficacité partielle (fenugrec, extrait d'écorces d'orange, d'algues). Ces produits peuvent agir directement contre le pathogène ou avoir une action élicitrice des défenses de la vigne (Belhadj et al., 2006). Il peut s'agir de bio-cides comme *Ampelomyces quisqualis* parasite de l'oïdium commercialisé aux USA (Falk et al., 1995) ou encore *Bacillus subtilis* homologué en France contre la pourriture grise (*B. cinerea*).

Malgré la demande du marché pour des produits issus de l'agriculture biologique, la gamme de produits de traitement de ce type et le volume des ventes restent faibles. La faible pénétration de ces préparations, sur le marché des pesticides, peut être expliquée par un manque d'intérêt de la part des firmes phytopharmaceutiques, ainsi que par l'échec des pouvoirs publics à faire évoluer les procédures d'homologation pour des préparations à efficacité partielle (Grant, 2005).

Par ailleurs, une recherche plus méthodologique est menée pour étudier l'émergence de résistances aux fongicides (par exemple Matasci et al., 2008) et les modes de gestion qui permettent de les gérer (Waard et al., 1993; Deliere et al., 2003).

Ce type de recherche s'intègre avec les recherches en modélisation visant à prédire les dates de début des contaminations primaires, ainsi que les risques de développement. Ces modèles sont couramment utilisés en France contre le mildiou (modèles EPI89 et Milvit, Tran Manh Sung et al., 1990; Magnien et al., 1991, respectivement), mais aussi à l'étranger (par exemple aux USA Madden et al., 2000).

Par contre, la France ne dispose pas de modèles prédictifs contre l'oïdium de la vigne, alors que des outils ont été évalués en Californie (Gubler et al., 1999) et en Allemagne

Protection Indirecte des Plantes (=Prophylaxie)	1	Utilisation optimale des ressources naturelles <i>par exemple adapter la culture aux conditions locales ; attente de rendements adaptés ; variétés résistantes et clones ; gestion des adventices selon l'intensité de la compétition avec la culture ; varier les cultures et les variétés ; choix optimal de l'époque de semis ; système de conduite optimale ; zones de compensation écologique</i>
	2	Pratiques agricoles sans impact négatif sur l'agro-écosystème <i>par exemple pas de surdosage des nutriments (particulièrement N) ; densité optimale des cultures et du feuillage (aération) ; Labours/cultures de faible intensité et méthodes de production protégeant la fertilité des sols ; gestion des adventices (contrôle de l'érosion) ; gestion de l'habitat (zone refuge/enherbement) pour améliorer la biodiversité.</i>
	3	Protection et promotion des auxiliaires (arthropodes, champignons et plantes utiles) <i>par exemple évaluation des effectifs de chaque espèce auxiliaire ; introduction de populations ; sols résistants ; gestion de l'habitat</i>
Décision pour l'application de mesures de contrôle direct : Systèmes de surveillance et de prévision <i>Modèles épidémiologiques et prédictifs (moments, occurrences et risques)</i> <i>Seuils économiques et niveaux de tolérance.</i>		
Protection directe des plantes (=Contrôle)	4	Utilisation de méthodes de contrôle agissant uniquement sur l'organisme visé (insectes, maladies, adventices) <i>par exemple biologique ou biotechnologique : technique d'insectes stériles ; introductions répétées de parasitoïdes sélectifs, prédateurs, entomopathogènes (par exemple virus) et champignons auxiliaires, résistances induites ; plantes auxiliaires, mycoherbicides et herbivores sélectifs pour le contrôle des adventices ; produits chimiques sélectifs : phéromones (par exemple confusion sexuelle)</i>
	5	application de mesures moins ciblées , là où l'étape précédente ne permet pas de prévenir les dommages économiques : <i>pesticides semi sélectifs : par exemple Bacillus thuringiensis, régulateurs de croissance des insectes, fongicides IBS [attention résistances aux IBS]</i> <i>Pesticides à large spectre : rémanence courte.</i>

source : Boller et al. (1998, in Boller et al. 2004)

TABLE 1.2 – La protection des cultures dans le contexte de l'agriculture durable (agriculture intégrée et biologique)

(Kast, 1995). Ces deux exemples oïdium associent les outils de prédiction des risques épidémiques à une préconisation de traitements basée sur des seuils de décisions. Cette démarche peut être également illustrée par le développement pour la lutte contre le mildiou du système « Vitimeteo » : un OAD germano-helvète, sur Internet, intégrant des modèles climatiques et des règles de décisions associées à des seuils sur un réseau de stations météorologiques (Bleyer et al., 2007).

D'autres démarches encore cherchent à combiner les éléments précédents : elles mobilisent par exemple les connaissances épidémiologiques et la physiologie de la vigne pour positionner les traitements contre le black rot en combinaison avec une suppression mécanique des baies momifiées pour réduire l'inoculum (Hoffman et al., 2004)

L'ensemble de ces démarches associant outils de prédiction des risques et règles de décision de traitement sur la base de seuils est assez caractéristique de la pratique des phytopathologistes.

1.2.2.2 Quelle pratique de la protection intégrée en viticulture

Sur la base du référentiel PI viticulture (Malavolta and Boller, 1999) et à l'initiative de l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV) *ex* ITV, un référentiel national « production intégrée de raisins » a été édité (Coulon and Sentenac, 2000). Il reprend en grande partie les exigences et recommandations proposées par l'OILB laissant aux référentiels régionaux le soin de détailler les préconisations techniques. Dans le prolongement, un cahier de diagnostic technique de la production viticole fournit les outils d'évaluation (IFVV, 2002) de la qualité de mise en œuvre. L'IFV a mené une évaluation de l'adoption de la PI dans les vignobles du Sud Ouest (Coulon and Hugueniot, 2008). Il en ressort qu'après une phase d'adhésion et de progrès rapides, la mise en conformité des pratiques avec les objectifs minimaux de la PI marque le pas. Parmi les exploitations interrogées qui mettent en oeuvre une production intégrée de raisins, aucune ne satisfait l'ensemble des critères requis dans le référentiel national.

Plus particulièrement, en matière de protection intégrée, la prophylaxie n'est pas assez répandue ; face aux ravageurs, certains traitements insecticides d'assurance sont encore préférés aux méthodes alternatives de contrôle qui ont pourtant montré leur efficacité. Pour ce qui est de la lutte contre les maladies cryptogamiques, les réductions du nombre de traitements sont à ce jour limitées et les solutions pour les réduire de 50% en 10 ans ne sont pas encore disponibles^c. Les raisons identifiées à cet état de fait sont : les manques de solutions techniques, le manque de formation notamment en diagnostic phytopathologique, la sous utilisation des suivis à des fins décisionnelles, mais aussi le coût des opérations prophylactiques ou d'observation.

La Production Intégrée reste relativement peu répandue. L'adoption de l'agriculture raisonnée est une première étape, mais les viticulteurs devront modifier encore leurs pratiques pour répondre aux attentes réglementaires à venir. Pour cela les acteurs de la recherche et du développement doivent trouver et mettre au point des solutions innovantes permettant de réduire massivement l'usage des pesticides dont les fongicides de synthèse notamment.

c. On y travaille

1.3 Les maladies cryptogamiques de la vigne

Pour comprendre la logique des systèmes de décision pour la protection du vignoble qui seront présentés dans cette thèse, il est nécessaire de connaître les bases de la physiologie et de l'épidémiologie de l'oïdium et du mildiou de la vigne.

1.3.1 Éléments de pathologie végétale

Cette section fournit quelques généralités sur les maladies cryptogamiques. Les informations données dans cette section sont pour la plupart des connaissances standard qui pourront être approfondies avec les ouvrages qui nous ont servi de références : Agrios (2005); Rapilly (1991); Trigliano (2004) pour la phytopathologie en générale et Pearson and Goheen (1988); Galet (1991); Dubos (1999) pour la vigne en particulier. Le lecteur possédant des notions de pathologie végétale peut se rendre immédiatement à la section 1.3.2.

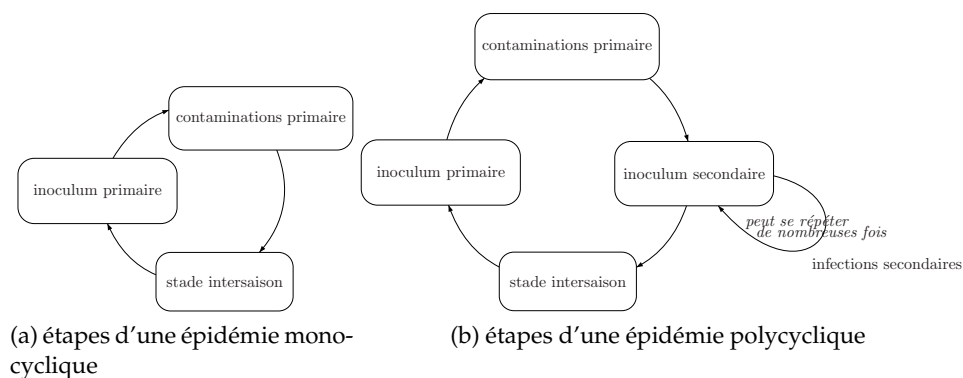
Une plante est malade lorsque ses fonctions physiologiques sont perturbées. Les plantes sont sensibles à de nombreuses maladies causées par différents bio-agresseurs (virus, phytoplasme, bactéries, champignons ou insectes ravageurs).

Définition 2. On définit un bio-agresseur une espèce comme nuisible au sens de l'OILB, c'est à dire une espèce qui cause plus de pertes que de bénéfices (Boller et al., 2004). Il faut préciser que les bénéfices et les pertes s'appliquent ici à la physiologie de la plante.

Les maladies cryptogamiques sont causées par des « champignons » pathogènes de la plante hôte. On distingue les *nécrotrophes* qui se nourrissent de tissus nécrosés, des *biotrophes* qui se développent dans des tissus vivants. *Botrytis cinerea* est un exemple de pathogène nécrotrophe. Il peut se développer sur de la matière organique en décomposition (*saprophytisme*) comme les capuchons floraux après la floraison de la vigne mais aussi sur des tissus sains. On le qualifie de *parasite facultatif*. A l'opposé, on distingue les biotrophes dont le parasitisme est spécifique à un hôte (*parasite strict*). Il s'agit d'un organisme qui, non seulement, nécessite un hôte sain pour se développer (*parasite obligatoire*) mais qui est, de plus, totalement inféodé à une espèce particulière. *Plasmopara viticola* et *Erysiphe necator*, responsables respectivement du mildiou et de l'oïdium de la vigne, sont tous deux des parasites stricts de la vigne (*Vitis sp.*).

Le cycle biologique (fig. 1.3) débute par la *contamination primaire* de l'hôte par une spore (fig. 1.9(c)) issue de la reproduction sexuée du cycle végétatif précédent. Le contact de la spore avec l'hôte déclenche une série de réactions de *reconnaissance biochimique* (Lepoivre, 2007) de la part de chacun des deux organismes. On parle pour cette phase de *pollution*. L'hôte déclenche une réponse de type immunitaire et le pathogène met en œuvre sa stratégie d'infestation (ces stratégies sont variées, on développera celle de *P. viticola* et *E. necator* dans les sections qui leur sont respectivement consacrées). Ces stratégies sont constituées des phases de *germination* et de *pénétration*.

Une fois la *pénétration* réussie, le parasite biotrophe développe des thalles mycéliens. Pendant le *période d'incubation* qui est plus ou moins longue, le mycélium colonise son hôte, alors même qu'aucun symptôme ne s'est encore exprimé. L'incubation est concomitante à la période de latence, qui se termine par la première sporée (fig. 1.9(e) et fig. 1.10(f)).



source : Agrios (2005)

FIGURE 1.3 – Diagrammes des dynamiques des maladies. Les maladies monocycliques n'ont pas d'inoculum secondaire ni d'infections secondaires au cours de la même année.

On entre alors dans la période contagieuse où, sous conditions favorables de l'environnement, les spores libérées peuvent contaminer à nouveau l'hôte et commencer un cycle secondaire. Cette période se termine par la fin de la sporulation.

Les champignons phytopathogènes se distinguent par leurs cycles de reproduction intra-annuels. Un pathogène est dit à dynamique *monocyclique* (fig. 1.3(a)) s'il se reproduit une seule fois dans l'année. S'il y a plusieurs reproductions au cours d'une année, on parle de dynamique *polycyclique* (fig. 1.3(b)).

A la fin de l'été, le cycle de reproduction sexuée se met en place et permet de produire les formes de conservation sexuée qui permettront les contaminations primaires de l'année suivante (voir fig. 1.9(a) et fig. 1.9(b)). La capacité d'une population de bio-agresseurs à se perpétuer d'une année sur l'autre (sa dynamique inter-annuelle) caractérise le degré de *polyétisme* de l'espèce.

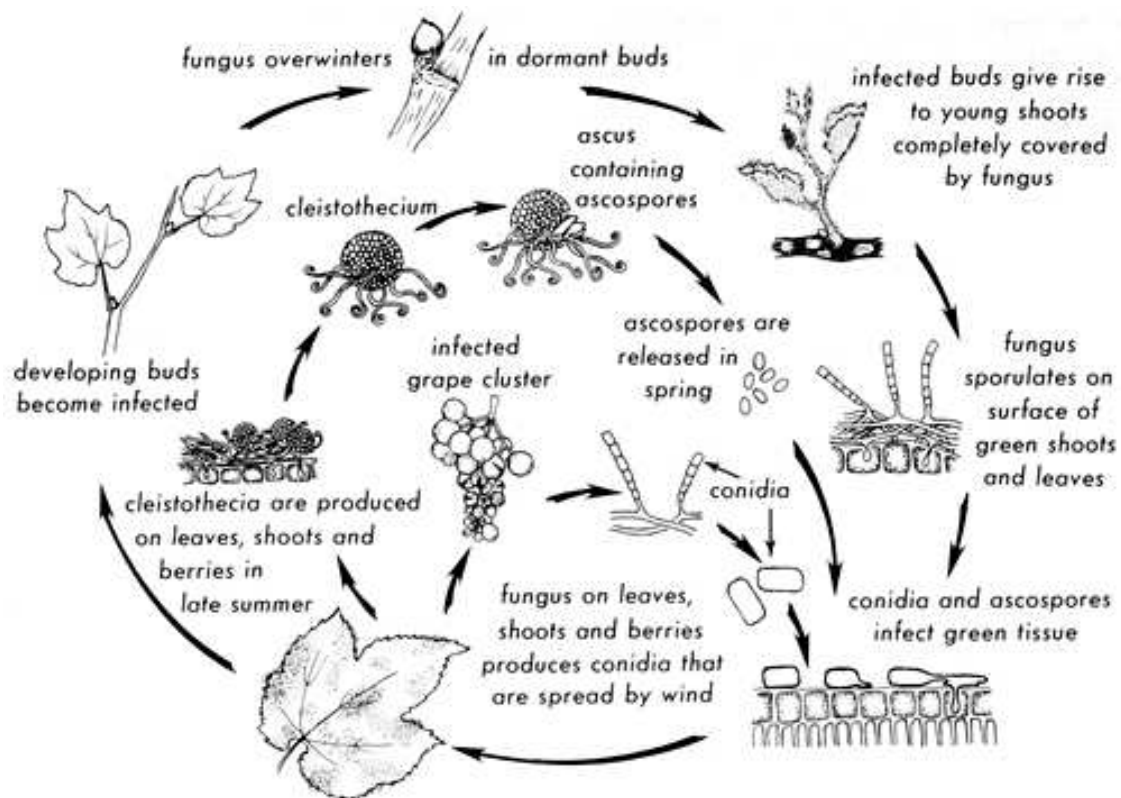
1.3.2 L'Oïdium de la vigne

La description de l'oïdium se fera en deux temps. En premier, on présente la biologie du pathogène, puis l'épidémiologie de l'oïdium sera évoquée.

1.3.2.1 Description du pathogène :

L'Oïdium de la vigne est causé par un champignon de la classe des ascomycètes : *E. necator*, anciennement *Uncinula necator*. Il a colonisé l'ensemble des vignobles de la planète depuis son bassin d'origine qui semble se situer en Amérique du Nord. *Vitis vinifera* la vigne européenne est particulièrement sensible à l'oïdium, alors que les vignes originaires d'Amérique (par exemple *Vitis riparia*) ou encore certaines vignes hybrides, sont naturellement résistantes aux épidémies d'oïdium. Introduite en France en 1847, elle est la plus ancienne des maladies américaines ayant ravagé le vignoble européen au XIX^e siècle. Aujourd'hui, il s'agit du pathogène causant le plus de pertes à la viticulture, en France comme à l'étranger.

Détaillons le cycle de l'oïdium présenté en figure 1.4. La conservation hivernale de l'oïdium se fait d'une part sous forme de mycélium conservé dans les écailles des



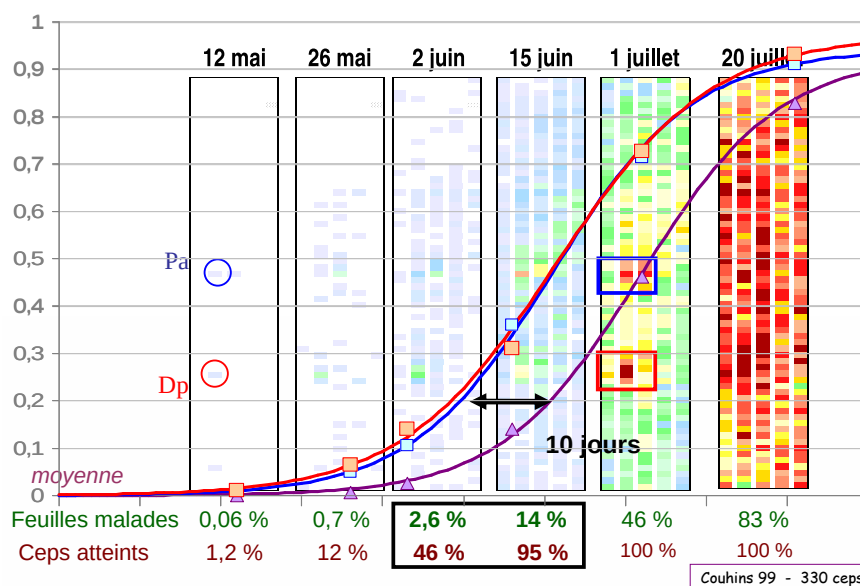
source : Pearson and Goheen (1988)

FIGURE 1.4 – Cycle de vie de l'oïdium de la vigne (*Erysiphe necator*)

bourgeons (pouvant donner lieu à des symptômes de drapeaux sur certains cépages à savoir de jeunes pousses difformes ou déformées). Une seconde forme de conservation existe : les cléistothèces (fig. 1.9b). Les cléistothèces sont produits à la fin de l'été par la rencontre de deux filaments de mycélium donnant lieu à une reproduction sexuée. Ils se nichent à l'automne dans l'écorce des ceps. Au printemps, lorsque les températures sont de nouveau favorables ($T^{\circ} > 15^{\circ}\text{C}$), le mycélium dormant reprend sa croissance et une légère pluie provoque l'ouverture des cléistothèces et l'éjection des ascospores (Gadoury and Pearson, 1990) voir fig. 1.9d.

L'ascospore en contact avec la vigne germe en quelques heures. La spore germée installe des suçoirs (*haustoria*) perforant la paroi cellulaire. Le réseau mycélien se développe en surface de la feuille à partir de ces premiers ancrages. L'incubation dépend de la température et de l'humidité relative et dure 8 à 30 jours. La sporulation nécessite une humidité relative de 40% à 100% pour permettre l'émergence des conidiophores.

Cette sporulation est le principal symptôme sur feuille de la présence d'oïdium. Il s'agit souvent d'une efflorescence (feutrage) blanc translucide virant au gris sur les colonies anciennes. Les premiers symptômes forment de petites taches circulaires sur la face inférieure des jeunes feuilles, taches qui s'étendent et se rejoignent, et peuvent couvrir toute la surface de la feuille d'un voile clair en fin de saison (fig. 1.10(h)).



source : P. Cartolaro, Santé Végétale, Inra, Bordeaux

FIGURE 1.5 – Développement d'une épidémie d'oïdium à partir de deux foyers naturels. L'intensité (feuille/ceps) des dégâts observés sur les premiers ceps contaminés se généralise en intensité moyenne à la parcelle avec un décalage d'une dizaine de jours

1.3.2.2 Épidémiologie

L'oïdium peut se reproduire dans des conditions d'humidité relativement faible et sans besoin d'eau liquide. Cette sobriété hydrique en fait la principale maladie cryptogamique des vignobles méditerranéens. Les conditions optimales de température se situent entre 20°C et 22°C. La croissance du mycélium est possible entre 4.5°C et 40°C et des contaminations sont possibles entre 15°C et 32°C.

De telles aptitudes créent des épidémies explosives. A Bordeaux, les premiers symptômes peuvent être observés, en fonction des conditions météorologiques, dès les premières feuilles entre la fin du mois d'avril et la première quinzaine de mai. A ce moment de l'année, les conditions de température et d'humidité sont favorables (Jailloux et al., 1998) et la croissance foliaire de la vigne assure au pathogène une grande quantité de matériel végétal sensible.

Sans mesure de contrôle, l'oïdium peut toucher les inflorescences avant même la floraison et détruire la récolte, principalement dans le cas de *V. vinifera*. En cas de contamination des inflorescences avant, pendant et juste après la floraison, les fruits ne peuvent se développer, l'oïdium provoque l'éclatement des baies (voir fig. 1.10d). Ces lésions sont alors la porte d'entrée d'un cocktail saprophytique dominé par *B. cinerea*. La résistance ontogénique est toutefois rapidement acquise : les baies sont quasi immunisées contre *E. necator* quatre semaines après la floraison (*V. vinifera* cvs. Chardonnay, Riesling, Gewurtztraminer, Pinot et *V. labrusca* cv. Concord) (Ficke et al., 2002). D'après Gadoury et al. (2003), deux semaines après la floraison, les nouvelles infections d'oïdium ne donnent plus lieu à de graves épidémies.

L'oïdium se développe à partir de foyers initiaux en formant des taches qui finissent

par se regrouper et envahir l'ensemble de la parcelle (voir fig. 1.5). Les processus de développement des épidémies de la feuille jusqu'à la parcelle dépendent principalement du vent dans la canopée (causé par vent réel ou par les pulvérisateurs ou encore lors des travaux en vert) (Willocquet and Clerjeau, 1998). L'étude des dynamiques d'infections à l'échelle du cep est modélisée puis simulée afin d'observer les relations entre les dynamiques de croissance de la vigne et l'épidémie, mais également le lien entre l'architecture du cep et les épidémies susceptibles de se développer en fonction de la densité du feuillage, de l'humidité dans le cep ou des flux d'air (Calonnec et al., 2008).

Ce type de modèles épidémiologiques sophistiqués vient à la suite de travaux inspirés des modèles plus simples de type Vanderplank (1963) dans lesquels l'épidémie est un processus auto-générateur et non le produit de l'interaction entre un bio-agresseur et son hôte (voir encadré 2).

La dynamique d'une épidémie est caractérisée par :

- x_0 le stock d'inoculum primaire en début de saison.
- p la durée de la période de latence.
- N le taux relatif de sporulation.
- i la durée de la période infectieuse qui induit le taux de retrait (après un certain temps de sporulation, les tissus infectés ne jouent plus dans la dynamique de la maladie ils sont dit retirés).
- E l'efficacité d'infection, qui résume à la fois l'ampleur de la dispersion des spores et l'efficacité de la contamination.

Le modèle s'écrit :

$$dX(t)/dt = \begin{cases} E \times (X(t-p) - X(t-p-i)) \times (1 - X(t)) & \text{si } t > 0 \\ x_0 & \text{sinon} \end{cases}$$

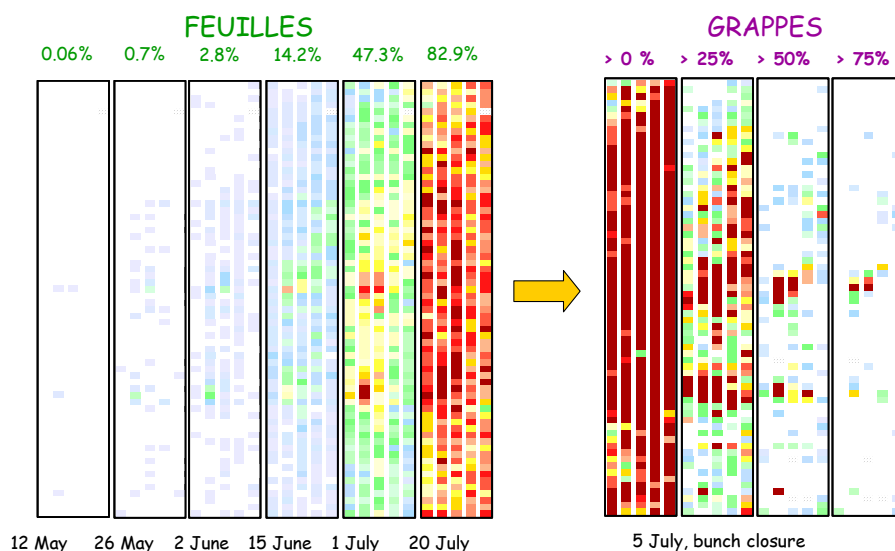
où $X(t)$ est la proportion de tissus infectieux à l'instant t et par conséquent $1-X(t)$ la proportion de tissus sains.

source : Zadoks and Schein (1979); Blaise and Gessler (1992)

Encadré 2 – Structure d'un modèle de type Vanderplank corrigé pour le temps de latence et la période infectieuse (le retrait)

Le modèle Vanderplank ignore les variations de température et la croissance du végétal. Sall (1980) présente un exemple de la prise en compte de la croissance de l'hôte dans le développement de l'épidémie. Ce modèle permet d'étudier les conditions favorables à l'oïdium. Sall conclut que l'ampleur des épidémies dépend fortement des températures printanières^d et rappelle que la pluie n'a aucun impact. L'ampleur et la précocité de ces épidémies foliaires de début de saison sont étroitement liées aux dégâts qui se déclareront sur grappes à la vendange (Calonnec et al., 2006, voir fig. 1.6).

La littérature semble bien insister sur l'importance d'un contrôle précoce de l'oïdium pour maîtriser la phase explosive. Le second point qu'il faut retenir, c'est que, rapidement après la floraison, la sensibilité des grappes diminue fortement (2 à 4 semaines post floraison). Enfin, Calonnec et al. (2004) ont montré que la présence de dégâts modérés d'oïdium sur grappes n'entraîne pas de déviation aromatique : les experts ne détectent



source : A. Calonnec, P. Cartolaro, Santé végétale, Inra, Bordeaux

FIGURE 1.6 – La précocité des attaques d’oïdium sur feuilles induit l’intensité des dégâts sur grappes (nbr de grappes touchées/nbr de grappes totales.)

une dégradation dans les vins (cv. Cabernet sauvignon) qu’à partir de 25% de baies oïdiées (50% pour les non experts). Si l’oïdium n’a pas d’effet majeur sur le goût du vin (il y a d’ailleurs débat à ce sujet [Stummer et al., 2003](#)), les quantités récoltées sont diminuées de manière non négligeable ($\approx 20\%$ de masse en moins pour les baies oïdiées).

Ces trois éléments permettent de penser que des programmes économes en traitements peuvent être conçus par la détection précoce des épidémies. Pour autant, à notre connaissance, il n’existe pas de modèle de prévision des risques épidémiques oïdium à l’exception des travaux de [Gubler et al. \(1999\)](#) à UC Davis. L’approche prônée par l’UMR Santé Végétale consiste à réaliser une détection précoce de l’épidémie dans les parcelles par observation, malgré les difficultés d’observation de ces petits symptômes discrets.

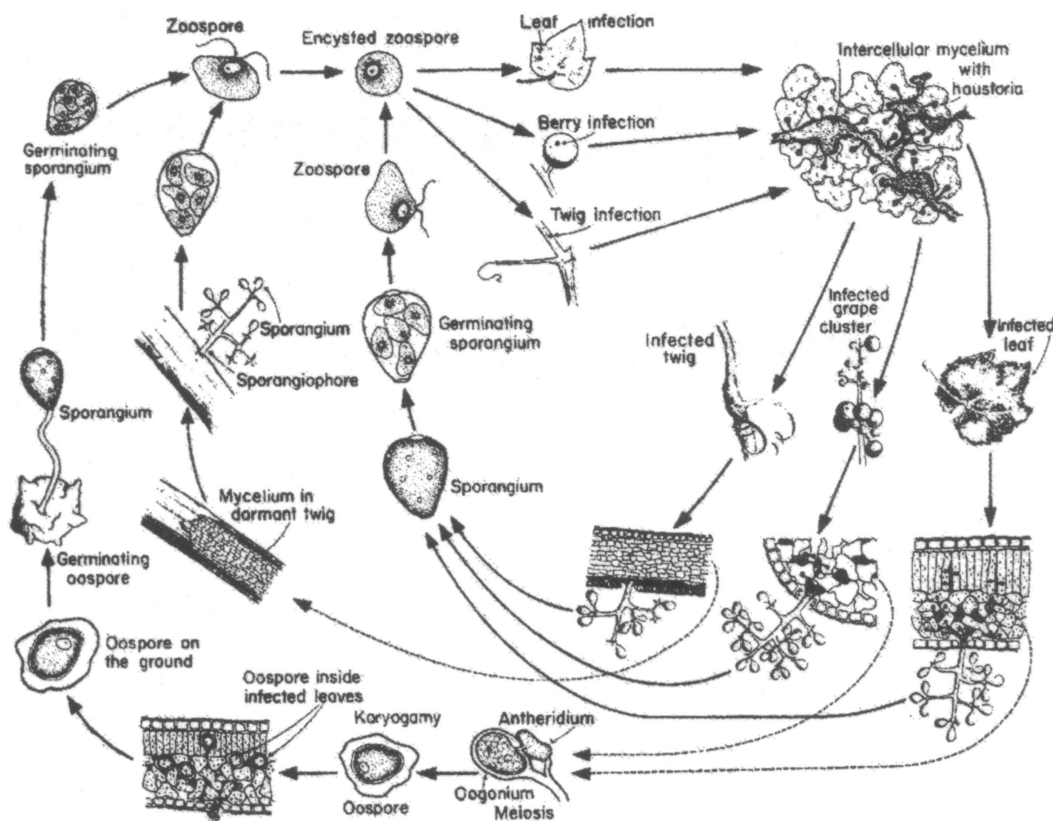
1.3.3 Le mildiou de la vigne

La présentation du mildiou reprend la même structure d’exposé que pour l’oïdium. On présente d’abord la biologie du pathogène, puis l’épidémiologie du mildiou.

1.3.3.1 Description du pathogène :

Le mildiou de la vigne est causé par *Plasmopara viticola*. Il s’agit d’un champignon microscopique (*Chromiste*) proche des algues, de la classe des oomycètes. Cette espèce a colonisé l’intégralité des vignobles de la planète depuis son bassin d’origine dans la région des grands lacs nord-américain. Son introduction date de 1878 à partir de plants de vignes américaines introduites en France dans des expérimentations contre

d. Les épidémies sont d’autant plus fortes que les températures printanières sont supérieures à la moyenne.



source : Agrios (2005)

FIGURE 1.7 – cycle de vie du mildiou de la vigne (*Plasmopara viticola*)

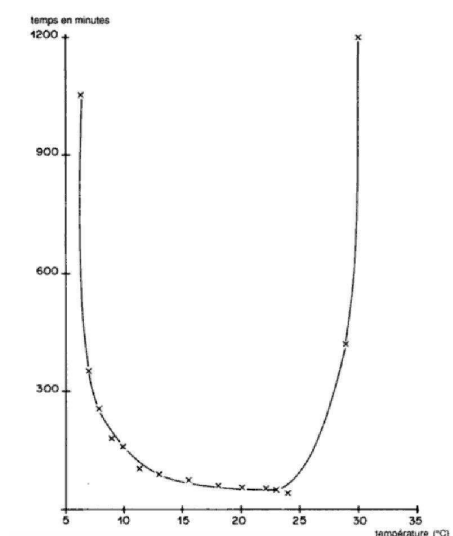
le phylloxera. Les études génétiques montrent qu'il y a eu plusieurs introductions en Europe (Gobbin et al., 2006).

P. viticola connaît un cycle annuel (voir fig. 1.7) débutant à la fin de l'été par la reproduction sexuée. Les oospores sont conservées dans les feuilles mortes pendant l'hiver. La conservation et la maturation des œufs d'hiver sont un phénomène encore mal connu et il n'existe aucune relation entre l'épidémie de l'année $n - 1$ et l'épidémie de l'année n qui permettrait de prédire les contaminations primaires. Le modèle POM (Ronzon and Clerjeau, 1988) permet cependant, à partir de données climatiques, d'estimer les dates des premières contaminations primaires.

Les oospores matures germent produisant un sporange. Ces sporanges entrent en contact avec les organes herbacés de la vigne par « splash » lors de fortes pluies et relâchent des zoospores (fig. 1.9(c)). Les zoospores pénètrent dans les tissus végétaux par les stomates. La latence dure entre 5 jours et deux semaines selon les conditions climatiques. A la suite de cette période, des conidiophores sont émis à travers les stomates causant une efflorescence (feutrage) blanc gris principalement sur la face inférieure des feuilles mais également sur les fructifications avant la véraison (voir fig. 1.10(a)). La sporulation est déclenchée par une pluie ou une rosée importante.

Les sporanges sont arrachés des conidiophores, par le vent ou par vibration. Au contact avec de l'eau liquide, les sporanges libèrent des zoospores qui peuvent déclencher un cycle secondaire de contamination. Les cycles secondaires sont une forme de reproduction clonale. Des recherches génétiques récentes ont montré que, loin de se cantonner au début de la saison, les contaminations primaires auraient lieu tout au long de la saison. Les deux types de reproduction seraient en fait concomitants (Gobbin et al., 2003; Rumbou and Gessler, 2006), si l'on considère que le gradient de dispersion des contaminations secondaires est faible (20m selon ces auteurs).

Le mildiou a besoin d'eau liquide afin que les zoospores puissent infecter la plante. La vitesse de contamination dépend de la température (voir fig. 1.8) et l'eau liquide doit être disponible tout au long de cette durée. On estime qu'une pluie d'environ 20mm et une humectation de 2h sont nécessaires pour permettre au mildiou de se développer dans des conditions favorables.



source : donnée de Ravaz et Verge cités par Arnaud et Arnaud, 1931 in Rapilly (1991)

FIGURE 1.8 – Vitesse (min/°C) de germination des spores de *Plasmopara viticola* dans film d'eau en fonction de la température

1.3.3.2 Epidémiologie

Le vignoble Français est constitué en quasi totalité de plants sensibles au mildiou. Dépourvue de gènes de résistance (Clerjeau, 2000), cette vigne ne semble pas déclencher de réponse « immunitaire » à l'infection par *P. viticola*, à la différence des vignes américaines résistantes (Kortekamp and Zyprian, 2003).

Les jeunes feuilles de vignes sont particulièrement sensibles, mais Reuveni (1998) a montré que des mécanismes de résistance se mettent en œuvre lors du vieillissement des feuilles. Les grappes sont très sensibles et ce jusqu'à la fin de la floraison. Elles acquièrent une résistance ontogénique quasi-complète environ 15 jours après la floraison (Kast and Schiefer, 2003, précise que les rachis peuvent être contaminés jusqu'au stade 73^e). Néan-

e. selon l'échelle BBCH (Lorenz et al., 1995)

moins, pendant ce délai, les contaminations peuvent avoir lieu sans que le parasite ne parvienne à sporuler, il se développe à l'intérieur de la baie causant des symptômes de *rot brun* (Kennelly et al., 2005).

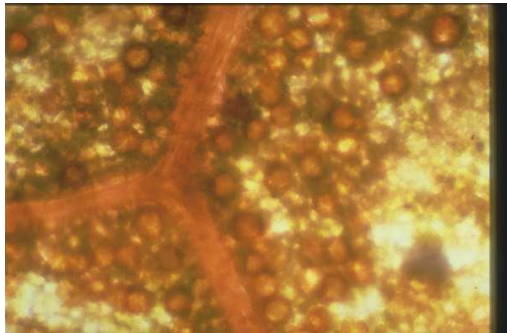
En ce qui concerne les dynamiques de population, de nombreux modèles ont été développés pour estimer la date de maturité des oospores : le modèle POM a déjà été évoqué et on peut rappeler les travaux du Services Régionaux de la Protection des Végétaux (SRPV) en la matière (Rouzet and Jacquin, 2003). D'autres modèles sont développés pour estimer à partir de données météorologiques, les risques d'épidémies (Tran Manh Sung et al., 1990; Madden et al., 2000; Bleyer et al., 2007, pour ne citer que quelques exemples). On notera le récent modèle déterministe de Rossi et al. (2008). Les travaux de modélisation qui mettent en évidence la nuisibilité de la maladie (Blaise et al., 1995, par exemple) montrent la difficulté que nous avons à relier les dynamiques de maladies à un niveau de dommages, et encore plus aux pertes économiques.

Les facteurs identifiés pour expliquer ces échecs sont la méconnaissance des interactions entre l'hôte et le pathogène. Par exemple, l'effet du mildiou sur la capacité de la vigne à accumuler le sucre est mal connu. Par ailleurs ce type de relation n'est pas linéaire : puisqu'il a été montré que dans le cas extrême d'une défoliation totale mais tardive (post véraison), les réserves de la plante peuvent assurer une maturité normale aux baies (Candolfi-Vasconcelos et al., 1994; Hunter et al., 1995). Toutefois, une défoliation systématique sur plusieurs années pourrait épuiser la plante.

Si une pluie importante est un facteur reconnu pour la propagation du mildiou, l'importance de faibles pluies voire des rosées reste encore aujourd'hui mal quantifiée, faute d'outil adapté à la mesure de la durée d'humectation (Cicogna et al., 2005; Dalla Marta et al., 2005). Ce facteur rend difficile la modélisation d'une épidémie de mildiou.

Par ailleurs, les travaux menés par Gobbin et al. (2004) remettent fortement en cause le rôle des cycles de reproduction asexuée comme forme de propagation principale de la maladie. Gobbin et al. insistent sur le rôle non négligeable des contaminations primaires tout au long de la saison. Cette remise en cause des mécanismes précédemment envisagés devra être confirmée. Elle pourrait induire la révision de nombre d'outils de prévision des risques, et expliquer la difficulté de prévoir l'ampleur de l'extension de la maladie après un événement contaminant.

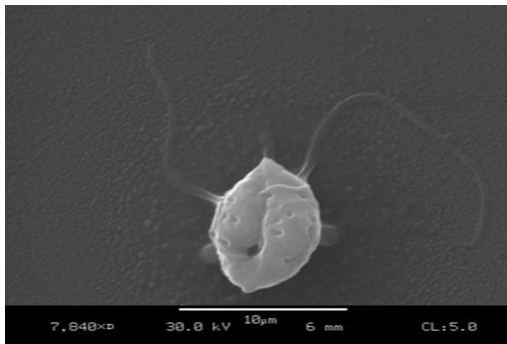
Le mildiou et l'oïdium possèdent des caractéristiques très différentes. L'important pour le contrôle de l'oïdium est d'observer les symptômes primaires pour bien maîtriser le début d'épidémie, la protection pouvant être interrompue assez rapidement après la floraison, d'autant qu'une quantité modérée de dégâts n'a pas d'effet sur le vin. En revanche le mildiou est conditionné par des événements contaminants qui ne sont pas tous observables. Cela rend l'estimation de la dynamique épidémique difficile, d'autant le modèle épidémiologique de *P. viticola* est remis en cause, les contaminations primaires étant observé plus tardivement que ce que l'on pensait précédemment.



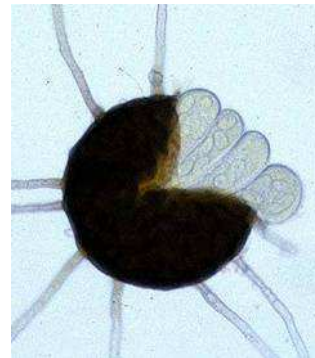
(a) Oospores de *Plasmopara viticola*



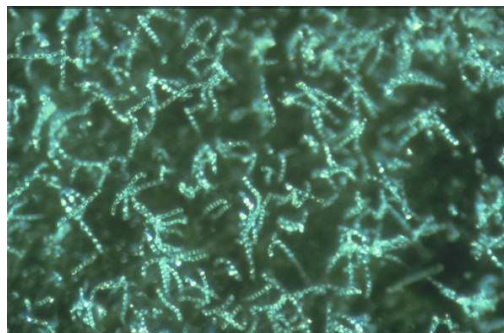
(b) Cleistotèces d'*Erysiphe necator*



(c) Zoospore bi-flagellé de *Phytophthora infestans* (responsable du mildiou de la pomme de terre) au microscope électronique. Ces zoospores ont la même architecture que ceux de *P. viticola*



(d) Cléistotèces ouverts et éjection des ascospores



(e) Conidiofores d'oïdium. Chaque chaînette est composée de 4 à 5 sporanges

source : Base de donnée Hyp3 : <http://www.inra.fr/hyp3/>

FIGURE 1.9 – Exemples de formes de conservation hivernale et de formes de reproduction secondaire



(a) le mildiou sur les inflorescences et les jeunes grappes colonise et sporule sur les rafles et les baies, qui finissent par se dessécher et par choir.



(b) L'oïdium sur les jeunes baies empêche la paroi externe de croître avec la pulpe causant finalement l'éclatement de la baie.



(c) Une contamination de la grappe depuis le rafle par le mildiou à la fermeture de la grappe cause des symptômes de rot brun. Les baies finissent par se dessécher et par choir.



(d) L'oïdium comme le mildiou peuvent coloniser les baies vertes tant que la concentration de sucre est $\leq 15\%$. Les grappes oïdiées se recouvrent d'un duvet gris blanc.



(e) Tache d'huile, le symptôme foliaire typique du mildiou.



(f) les premiers symptômes d'oïdium sont des tâches sporulantes discrètes sur la face inférieure de la feuille.



(g) Le mildiou mosaïque est un symptôme de fin de saison qui apparaît sur les feuilles âgées.



(h) L'oïdium peut en fin de saison recouvrir l'intégralité des feuilles. Sans conséquence pour la récolte.

source : Base de donnée Hyp3 : <http://www.inra.fr/hyp3/>
& P Cartolaro, UMR Santé végétale, Inra, Bordeaux

FIGURE 1.10 – Symptômes sur grappes et feuilles causés à gauche par le mildiou et à droite par l'oïdium.

1.4 Les travaux de l'UMR Santé Végétale - INRA Bordeaux

La section qui suit présente les travaux de recherche sur les Règles De Décision expertes, mis en œuvre depuis 2001 au sein de l'UMR Santé Végétale. Ces travaux sont à l'origine de mon travail de thèse. On illustre dans les pages qui suivent quelle fut la démarche de conception et les hypothèses faites par les pathologistes pour la réalisation des premières Règle De Décision (RDD) expertes. On montre ensuite les limites auxquelles ils se sont trouvés confrontés, ce qui me permettra de mettre en évidence les trois questions principales auxquelles cette thèse devait répondre.

1.4.1 Historique de l'action PIC vigne

On a vu au cours de la section précédente les enjeux de la protection intégrée des cultures et la nécessité en viticulture de réduire l'usage des pesticides. L'élaboration de Mildium a commencé en 2005, sur la base de deux règles de décision expérimentées de 2001 à 2004 : une « RDD mildiou » et une « RDD oïdium ». Auparavant, de 2001 à 2003, l'INRA a financé un programme transsectoriel national de dynamisation de la recherches en PIC : « l'action PIC ». L'UMR Santé Végétale y animait le groupe de travail sur la viticulture sous la direction du Pr. Michel Clerjeau. Dans le cadre de ce projet (Clerjeau, 2000), l'équipe PIC de l'unité, s'est associée avec l'UMR System de l'INRA de Montpellier pour concevoir et expérimenter des RDD pour la Protection Intégrée du Vignoble.

Le constat motivant cette approche se résume en quatre points que l'on retrouve dans Clerjeau (2000); Deliere and Clerjeau (2001) :

1. absence de méthodes de lutte biologique ou biotechnologique validées pour le contrôle des maladies cryptogamiques.
2. manque de connaissances vis à vis de la variabilité génétique de pathogènes
3. méconnaissance des interactions au sein de l'écosystème vigne
 - a) absence de relation de nuisibilité des maladies cryptogamiques sur la vigne
 - b) interaction entre les pathogènes et leurs antagonistes (largement méconnue)
 - c) interaction entre les symbiotes de la vigne et les pathogènes
4. méconnaissance de l'impact quantitatif des opérations culturales notamment celles connues pour leurs effets prophylactiques dans la construction du rendement et de la qualité.

Outre ces verrous de connaissances « biologiques », Clerjeau (2000) constate le manque d'outils méthodologiques permettant la conception et l'évaluation de stratégies PIC pour la viticulture.

1. Quel échantillonnage pour l'évaluation des épidémies ? Si les entomologistes sont parvenus à établir des seuils opérationnels, permettant de raisonner l'application de traitements pesticides, l'échantillonnage des symptômes pour les maladies reste un sujet de recherche.
2. Méthode d'évaluation à long terme des stratégies de lutte (par exemple l'évaluation à long terme de stratégies comme la confusion sexuelle reste à construire).

3. Absence de méthodologie pour la conception de stratégies PIC qui permettent aux agents du développement de produire des solutions d'aide à la décision adaptées aux agriculteurs.

Les objectifs de « l'action PIC vigne », étaient plus vastes que ce qui est présenté ici et que nous avons centré sur les maladies cryptogamiques. Au cours de ce projet, des RDD ont été élaborées par les experts de Santé Végétale, pour les ravageurs, l'excoriose, la pourriture grise, l'oïdium et le mildiou. *On n'abordera que les cas de l'oïdium et du mildiou qui nous intéressent ici.* Le lecteur pourra se référer à Delbac et al. (2006) à propos de RDD ravageurs et pour l'excoriose à Clerjeau (2004).

« L'action PIC » était initialement très influencée par l'approche méthodologique de Meynard et al. (2001). Cette méthodologie centrée sur le système de culture à la parcelle, combine l'étude des pratiques, l'étude holistique du système de culture (évaluation, diagnostic) et la proposition de solutions mieux adaptées (conception). *In fine*, le souci de concevoir des outils a dominé sur la production de connaissances. En effet, la mise en œuvre d'une PIC requiert des compétences pluridisciplinaires et est difficile pour la plupart des viticulteurs en l'absence d'orientations et de conseils. Si le Référentiel National PI (Coulon and Sentenac, 2000) associé au « Diagnostic Technique de Production Viticole Intégrée » (IFVV, 2002), fournissent un cahier des charges et une grille d'évaluation, ils répondent mal à la question : « Comment faire ? ».

1.4.2 Concevoir des Règles De Décision innovantes en Protection Intégrée des Cultures

La démarche de l'unité Santé Végétale se propose donc, d'une part de faire la preuve de la faisabilité d'Itinéraires Techniques (ITK) protégeant efficacement la vigne avec un nombre réduit de traitements dans le contexte bordelais, d'autre part, et plus largement, de concevoir des RDD PIC innovantes sur la base d'une expertise scientifique dont les pathologistes peuvent faire la synthèse.

Définition 3. Selon Clerjeau (2004), une Règle de décision concernant la protection contre une maladie est : « la formalisation explicite [et argumentée] d'une démarche et de choix s'appuyant sur des indicateurs précis conduisant à une décision de traitement dans le but d'atteindre un objectif fixé. »

Clerjeau (2004) précise que la construction d'une RDD reprend la formule :

$$RDD = Architecture + Matériaux$$

C'est à dire qu'elle est intelligible et adaptable et ne doit pas être appréhendée comme une recette.

Remarque : On doit comprendre que l'architecture contient les principes scientifiques traduits par des choix stratégiques qui structurent le programme, et que la partie matériaux représente les moyens de mise en œuvre, que ce soit les indicateurs opérationnels ou les seuils de décisions tactiques.

L'approche Santé Végétale est originale. D'une part, comme spécifié par Gary (2006) :

L'innovation portait sur la combinaison d'indicateurs liés à la présence d'agents pathogènes (observation de symptômes), à la réceptivité de la vigne (stades physiologiques sensibles) et à l'existence d'un risque épidémiologique (modèles d'avertissement et prévisions météorologiques).

in : Gary (2006)

D'autre part, les pathologistes se sont affranchis de l'approche plus traditionnelle qui consiste (i) à produire un modèle biophysique synthétique des connaissances, puis (ii) à rechercher une solution optimale sur la base de ce modèle. Enfin, leur approche reconnaît certes l'importance du recours aux modèles prédictifs comme outils de mise en alerte (Shtienberg, 2000), mais considère qu'en viticulture leur seule utilisation reste exagérément précautionneuse, outre que de tels modèles ne sont, en France, pas disponibles pour l'oïdium.

Remarque : *Au cours de mon travail de thèse, il m'a semblé plus approprié de parler de Processus Opérationnel de Décision (POD)^f que de RDD, la notion de processus mettant mieux en valeur l'aspect intégré et coordonné de l'ensemble des éléments de ce type de systèmes de décision.*

Pour la conception d'un Processus Opérationnel de Décision (POD), les pathologistes ont estimé qu'une combinaison d'observations à la parcelle et de modèles de prévision de risques permettrait une gestion des épidémies plus économe en intrants. Raisonner le POD sur l'ensemble de la saison permet, d'une part d'utiliser la connaissance pour organiser de manière rationnelle les périodes d'interventions, d'autre part d'exploiter l'expertise scientifique pour établir les seuils d'intervention, et enfin de s'appuyer sur l'expertise technique pour rendre opérationnels ces principes.

1.5 Conclusion : le besoin d'un formalisme

A l'issue de l'action PIC, un besoin de formalisme fut identifié. La formalisation mathématique devait permettre de standardiser les expérimentations. En effet les résultats des études menées sur les domaines de l'INRA à Bordeaux et à Montpellier sur les RDD séparées mildiou oïdium, ne pouvaient être aisément comparés du fait de la trop grande part d'interprétation personnelle dont les opérateurs avaient fait preuve. L'utilisation d'une modélisation formelle devait répondre à des questions relatives à la faisabilité du processus à l'échelle de l'exploitation. Les experts pathologistes espéraient également pouvoir améliorer et rendre générique le procédé par simulation de différents contextes climatiques et épidémiques.

Au cours de mon travail de thèse, ces demandes initiales ont pu être synthétisées en identifiant trois besoins.

Besoin de Communiquer. Il s'agissait d'assurer la transférabilité du POD, dans un premier temps à destination des scientifiques pour mener des expérimentations plus étendues, puis vers un public plus large, via un OAD. Cela nécessitait d'objectiver de manière exhaustive l'ensemble des dispositifs décisionnels du POD Mildium et d'en fournir une représentation ergonomique.

f. La notion de POD sera abordée en détail au chapitre 3.

Besoin Opérationnel. L'exemple du passage à l'exploitation a été évoqué ci-dessus. Cela implique que le formalisme de modélisation soit adapté à l'étude du comportement de plusieurs **POD** exécutés en parallèle au sein d'une exploitation, afin d'estimer les contraintes de ressources que le **POD** fait porter sur l'exploitation, mais également pour pouvoir identifier les synergies potentielle entre les différentes instances, qui favorisent la montée en charge. Pour ces raisons, il était nécessaire que le formalisme permette de simuler informatiquement la décision.

Besoin de Fiabilité. Les experts pathologistes ont une approche itérative de la conception, on l'a déjà dit. La formalisation devait donc les aider à améliorer leurs conceptions grâce à une meilleure compréhension de son fonctionnement, notamment grâce à la simulation. Enfin le formalisme devait permettre de rendre les décisions plus robustes notamment en terme de sensibilité moment (« timing ») de la prise de décision ou à la réactivité de sa mise en œuvre.

1.5.1 Approche et gestion de l'expertise

Une première démarche aurait consisté à travailler à l'objectivation de la connaissance scientifique et de l'expertise avec une représentation sous la forme d'une *base de règles de décision* souvent utilisée en intelligence artificielle ou dans le domaine des systèmes experts. Ce formalisme nous aurait permis de gagner en généricité. Il aurait ainsi été possible d'inférer des règles et donc produire une solution *ad hoc* en fonction de chaque contexte climatique. Cependant, d'une part la réalisation d'une ontologie de connaissances qui soit exploitable pour la protection de la vigne ne nous paraissait pas faisable en l'état actuel des connaissances ; d'autre part cette solution aurait rendue difficile la représentation du raisonnement comme un processus dans le temps, ce qui aurait rendu l'étude du comportement dynamique du système en terme de ressources et de fiabilité difficile. En outre, un système expert serait allé à l'encontre de la démarche plus directe de conception experte initiée par Santé Végétale et les résultats à l'issue de la thèse auraient probablement pu marquer une régression par rapport au stade initial en terme d'innovation pour la protection du vignoble.

L'hypothèse de départ était qu'il valait mieux produire un modèle du procédé existant, avec une retranscription aussi fidèle que possible du Processus Opérationnel de Décision expérimenté en 2005. Ce **POD** est un prototype dans une démarche expérimentale de mise au point et les travaux de formalisation poursuivis dans cette thèse s'intègre dans cette démarche. Le recueil d'expertise a permis d'objectiver ce **POD** qui est une solution possible au problème de contrôle **PIC** des épidémies de mildiou et d'oïdium de la vigne.

1.5.2 Formalisation de procédés

Le formalisme de modélisation mis en œuvre doit permettre de répondre aux trois demandes identifiées. La forte dépendance de la protection contre le mildiou aux *événements* climatiques et le caractère événementiel de la prise de décision m'a fait opter pour le cadre mathématique des Systèmes à Événements Discrets (**SED**). Ce paradigme de modélisation est connu par la communauté des automaticiens pour être adapté à la représentation des systèmes de production (systèmes de contrôle). Les **SED** servent éga-

lement de fondation mathématique à l'étude des *processus métiers* (« workflows ») dont l'objet consiste à modéliser l'organisation des tâches pour en étudier l'ordonnancement, les propriétés temporelles (début, fin) et la planification. Sans me placer strictement dans ce champ d'étude, je me suis inspiré de la démarche issue de l'industrie et j'ai opté pour le langage de modélisation de système réactif : Statechart (Harel, 1987). Les aspects théoriques des SED, des Statecharts et des automates sont présentés au chapitre 2. La modélisation des processus métiers fait partie de l'analyse critique de l'état de l'art en formalisation de la décision présenté au chapitre 3.

Chapitre 2

Identification d'un formalisme adapté à la représentation de Règles de Décision agronomique

Contents

2.1	Système et contrôle pour la protection intégrée des cultures	42
2.1.1	Système continu, discret ou hybride	42
2.1.2	Contrôler une épidémie	43
2.2	Cybernétique, contrôle et modélisation d’expertise	45
2.2.1	Système	45
2.2.2	Etat	47
2.2.3	Modélisation	47
2.2.4	Contrôle	49
2.2.4.1	Synthèse idéale de contrôleur	50
2.2.4.2	Synthèse de contrôleur en pratique	51
2.2.5	Une approche du contrôle à base d’expertise	51
2.2.6	Conclusions	54
2.3	Fondements théoriques des systèmes à événements discrets	54
2.4	Automates	56
2.4.1	Identificateur canonique (<i>canonical recognizer</i>)	57
2.4.2	Transducteurs	58
2.4.2.1	Machines de Moore	58
2.4.2.2	Machines de Mealy	59
2.5	Réseau de Petri	61
2.6	Statecharts	64
2.6.1	Le concept de Statechart	64
2.6.2	Syntaxe des Statecharts	66
2.6.2.1	Etats	66
2.6.2.2	Transitions	67
2.6.2.3	Triggers	68
2.6.2.4	Conditions	68
2.6.2.5	Actions	68
2.6.2.6	Pseudostates	69
2.6.3	Syntaxe formelle du Statechart	69
2.6.4	Sémantique des Statecharts UML	71
2.7	Conclusion du chapitre	72

Le concept qui pourrait se révéler éclairant, en l'occurrence, est celui d'évènement (...)

Qu'un fait ne soit qu'une exemplification particulière d'une régularité générale ou qu'il ait le caractère d'un surgissement historique, il signifie l'occurrence d'un nouvel état de choses, le passage d'une certaine figure du monde à une autre (...)

La notion d'évènement tente de dire la facticité du fait.

L'évènement est l'occurrence, dans la trame des processus qui constituent le monde et son histoire, d'un nouvel état de choses. Il est à la fois transition et surgissement, enveloppant ainsi la continuité et la discontinuité, la similitude et la différence, la reprise et la nouveauté (...)

Le véritable évènement, c'est le surgissement toujours advenant du monde, cette sorte de pulsation instauratrice en et par laquelle le cosmos ne cesse de se produire et de s'acheminer vers ce qui, de lui, est toujours encore à se constituer (...)

La notion d'évènement connote précisément un certain nombre de caractères qui affinent cette référence à la facticité. D'abord l'évènement a un aspect d'unicité : ce qui arrive, au sens fort du terme, se singularise par son occurrence même. Cette unicité joue à deux points de vue. D'une part, même s'il y a des traits qui se reproduisent, et s'il y a de l'invariance, le monde, considéré dans toutes ses déterminations, prend à chaque instant une figure singulière, et en ce sens n'est jamais totalement égal à lui-même. Et d'autre part, son devenir est en quelque sorte d'un seul tenant. Ce qui se produit en chaque moment n'est que la réfraction dans l'instant d'un processus d'ensemble qui s'étend dans la durée et qui est précisément l'incessante venue au jour du cosmos (...)

L'évènement met en œuvre un principe de liaison : ce qui se produit, à un moment donné, s'appuie toujours sur ce qui est déjà réalisé, reprend pour ainsi dire dans son acte même les processus antérieurs, qui sont, à l'égard des nouvelles opérations, des conditions de possibilité. Et en même temps, ce qui se produit annonce ce qui pourra suivre, en ce sens que de nouvelles conditions sont posées, qu'une nouvelle base est établie pour la construction d'architectures plus complexes. En somme, l'évènement effectue une transformation du champ des possibilités : en actualisant, à un moment donné, les possibilités objectives existantes à ce moment, il fait apparaître une nouvelle distribution des possibilités objectives, en laquelle s'amorcent déjà des développements ultérieurs.

— JEAN LADRIÈRE

Penser la Création (1976)

L'objectif de ce chapitre est de présenter le cadre théorique de modélisation pour mon travail. Pour cela, on analyse la nature d'un système de production agricole, soumis aux attaques d'un ou plusieurs pathogènes, et sur lequel l'agriculteur doit intervenir sous risque de perdre tout ou partie de sa production. Dans un premier temps, le problème la protection des végétaux est analysé comme un problème de contrôle. On présente ensuite le cadre théorique et les principales approches de modélisation des Systèmes à Événements Discrets (SED). Enfin, on terminera par une présentation du langage de modélisation que j'ai utilisé : *Statechart*.

2.1 Système et contrôle pour la protection intégrée des cultures

Dans les sections qui suivent, on cherche à caractériser les objets sur lesquels porte l'étude et à présenter les notions théoriques utilisées. On les présente dans le cadre pratique de la pathologie végétale, mais il est évident que ces notions théoriques restent valables dans d'autres domaines d'applications.

2.1.1 Système continu, discret ou hybride

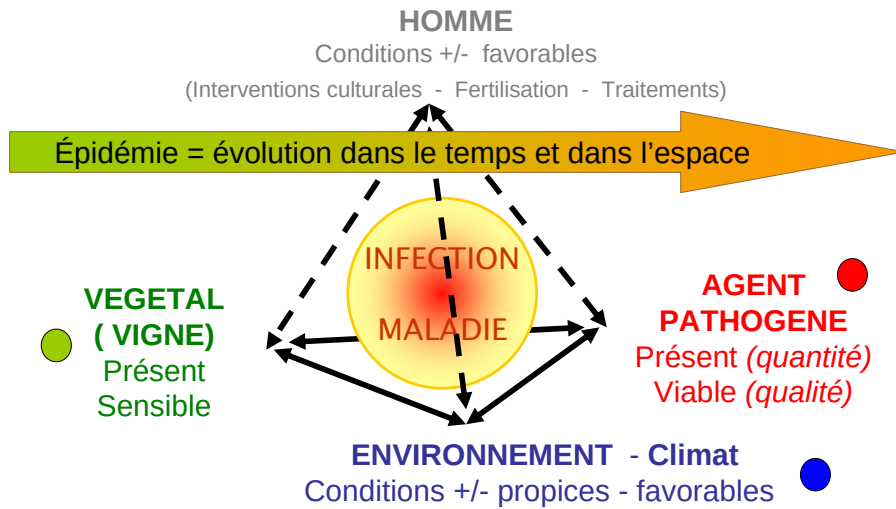
Une maladie se représente traditionnellement, en épidémiologie botanique, sous la forme d'un *pathosystème* (voir fig. 2.1). Il s'agit d'un *système* composé de quatre composants ou sous-systèmes, interagissant les uns avec les autres au cours du temps. En se plaçant à l'échelle de la parcelle, on observe différentes *dynamiques* de développement (des comportements) *continu* comme la croissance des plantes ou l'extension des symptômes de la maladie.

On observe également des *événements*, une pluie, une contamination, un travail au champ ou encore le débourrement. Ces événements entraînent parfois des évolutions *discrètes* du système (cas du mildiou nécessitant une période d'humectation pour pouvoir réaliser une nouvelle contamination). Cependant ce n'est pas toujours le cas et l'aspect *discret* ou *continu* d'un phénomène dépend en grande partie de l'échelle de *temps* avec laquelle on observe le système. Ainsi, la contamination par l'oïdium d'une culture correspond bien à un événement : la mise en contact d'une propagule pathogène avec son hôte est un événement discret par nature. Pourtant le développement des maladies fongiques se représente au cours de la saison comme un phénomène continu qu'on modélise classiquement par des équations différentielles (un exemple canonique est donné par Vanderplank, 1963, voir encadré 2). A l'inverse, à l'échelle de la journée, une opération culturale telle qu'un effeuillage^a se caractérise par une durée. Néanmoins par rapport à la saison végétative, échelle à laquelle les effets de l'oïdium sont mesurables, cette durée n'a aucune importance. L'effeuillage est alors perçu comme un instant, caractérisé cette fois par un avant, un après, et les modifications du système qu'il entraîne. On peut dès lors représenter l'occurrence d'un effeuillage comme une *action* sans durée provenant d'un composant du pathosystème pour modifier l'état d'un ou plusieurs autres composants.

In fine, on constate qu'un pathosystème tel que celui de la vigne combine des phénomènes discrets et continus. Ce type de système est dit hybride par les automaticiens et

sa complexité motive de nombreux travaux ; on pourra se référer par exemple à (Lunze, 2000).

PATHOSYSTEME



Source : P. Cartolaro INRA Santé Végétale Bordeaux

FIGURE 2.1 – Schéma des composantes d'un pathosystème

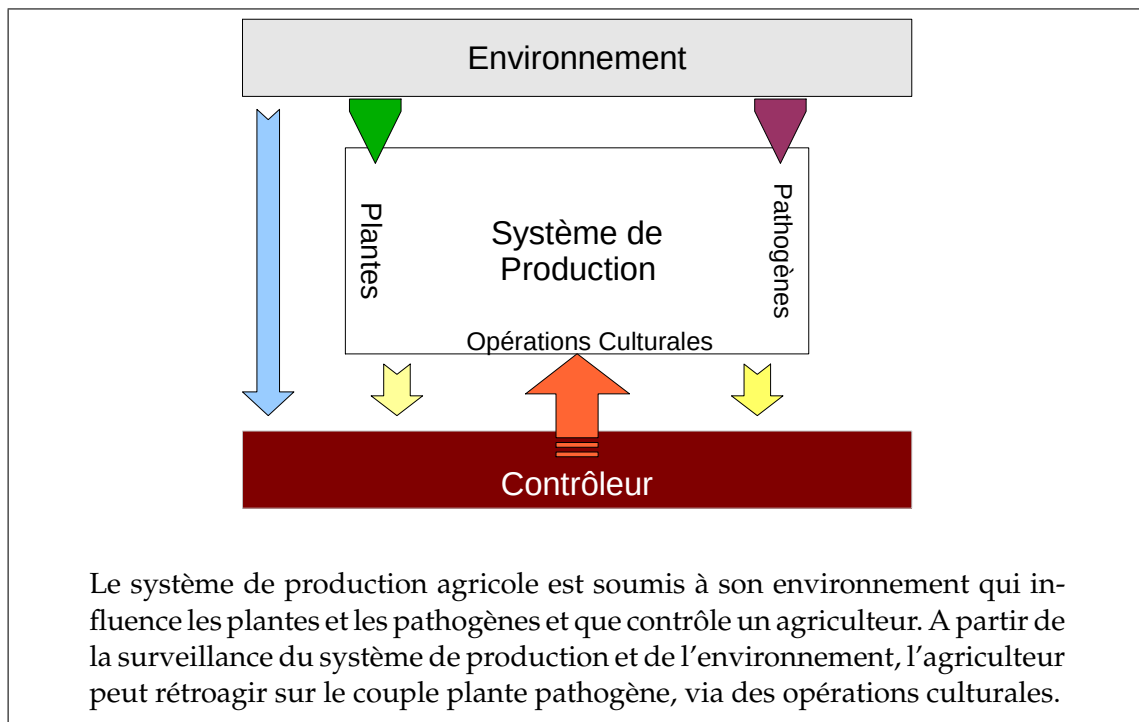
2.1.2 Contrôler une épidémie

Dans la section précédente on se plaçait du point de vue de l'épidémiologie qui modélise les épidémies de manière descriptive sous forme de pathosystèmes. Dans cette optique, le système est clos, c'est à dire que toutes les interactions ont pour origine et pour destination des éléments du système.

Prenons à présent un point de vue plus opérationnel. L'encadré 3 illustre ce point de vue. Un système de production soumis aux influences d'un environnement est *contrôlé* par un producteur. On pourrait le comparer à une usine composée de machines soumises à l'usure et aux incidents de production dont il s'agirait d'assurer les opérations de maintenance. Détaillons notre système de production agricole. Il s'agit d'une culture (la vigne) dont la production est mise à mal par des épidémies et dont la maintenance est assurée par des opérations phytosanitaires ou de prophylaxies. D'autres opérations culturales sont bien entendu nécessaires à la production. En agriculture, le système de production est soumis aux aléas du climat représentés fig. 3 par l'environnement.

La protection phytosanitaire est bien souvent, pour les maladies qui nous occupent, de nature systématique. L'agriculteur dispose dans ce cas d'un calendrier de traitements établi avant le début de la saison végétative et qui lui indique quand appliquer son premier traitement, quand renouveler l'application et à quelle cadence. Dans cette approche, il n'y a pas de prise en compte de l'épidémie en cours pour piloter la protection. L'ap-

a. En viticulture, l'effeuillage est une opération prophylactique consistant à aérer les grappes en retirant l'excès de feuillage qui les entoure, voir (Serrano, 2001).



Encadré 3 – Le système de production agricole

proche est purement préventive et l'objectif est de n'avoir aucune présence de maladie. NB. ceci n'est pas vrai pour toutes les maladies et toutes les cultures, mais s'applique fréquemment dans le cadre de la lutte contre les maladies cryptogamiques de la vigne.

L'approche systématique de la protection des cultures, diffère donc de la figure 3, en ceci qu'il n'y a pas de retour d'informations sur ce système. Par contre, dans le cadre de la protection dite raisonnée, une forme de prise en compte de l'épidémie est introduite notamment par l'utilisation des avertissements agricoles. Il est toutefois difficile de parler de contrôle, car la prise en compte de l'état du système (parcelle ou groupe de parcelles) reste très indirecte.

On ne pourra pourtant véritablement parler de l'usage d'un *contrôleur* sur le système de production que dans le cadre de la PIC (cf. section 1.2). Celle-ci peut notamment prendre la forme de la lutte biologique. Le contrôle des épidémies se alors fait en continu principalement par délégation de l'activité de contrôle à des auxiliaires biologiques (insectes, virus...) dont les populations doivent s'équilibrer avec celles des pathogènes (on parle alors de contrôle « feedback » puisque c'est l'état des populations de pathogènes qui détermine la dynamique des populations d'auxiliaires). Dans ce cas l'agriculteur se borne à un rôle de supervision, n'intervenant qu'en cas d'échec du contrôle biologique. L'agriculteur peut aussi, plus ponctuellement, intervenir par l'application de traitements phytosanitaires pour réduire^b les populations de pathogènes ou par la réintroduction de populations d'auxiliaires si celles-ci sont trop faibles (Tang et al., 2005).

Pour autant, la stratégie de lutte biologique n'est pas toujours possible comme on l'a expliqué précédemment (voir chap. 1 section 1.2.2). Il convient alors de contrôler les

b. Dans le cas de maladies fongiques il s'agit plutôt d'en ralentir le développement que de réduire l'infestation.

épidémies par une action directe de l'agriculteur sur son système de production. Dans l'idéal l'information serait, en référence à la théorie économique néoclassique, pure et parfaite, et le contrôleur recevrait en permanence de l'information en provenance à la fois du système de production et de l'environnement (cf. fig. 3 les flèches provenant de l'environnement, des plantes et des pathogènes sont les données d'entrées du contrôleur). Toujours dans l'idéal, le contrôle se ferait simplement grâce à une série de seuils d'intervention permettant de positionner les interventions de manière optimale et les revenus seraient ainsi garantis pour un niveau de risque accepté.

Lorsque l'agriculteur agit directement, les décisions d'intervention et les interventions elles-mêmes sont des *événements ponctuels* (cf. fig. 3 flèche en retour du contrôleur au système contrôlé). Pour autant, on a défini plus haut que le système contrôlé suit une dynamique continue que l'on est capable d'observer parfaitement : l'information est donc elle aussi continue. Il faut donc conclure à l'association de phénomènes continus et discrets dans le couple *système + contrôleur*, donc à un système hybride. Cependant, ce cadre idéal d'information n'est pas réaliste. En effet, l'information en entrée a un coût d'acquisition pour l'agriculteur et ne peut être obtenue que de manière ponctuelle. Entre ces instants d'observation, le contrôleur est « aveugle » quant à l'état du système contrôlé. En outre, nous ne disposons pas de modèles continus décrivant correctement le pathosystème pour ceux que nous traitons dans cette thèse. En ceci, notre étude diffère grandement des modèles de supervision hybride décrits par (Lunze, 2000).

Dans notre problématique, le contrôleur ne communique avec l'environnement et les systèmes de production que par des événements, aussi bien pour ses entrées que pour ses sorties. Nous avons choisi le formalisme des Systèmes à Événements Discrets pour le représenter

. Notre travail consiste à modéliser formellement le Processus Opérationnel de Décision (POD) présenté au chapitre 1 pour le contrôle de l'oïdium et du mildiou de la vigne, dans le cadre formel des SED.

2.2 Cybernétique, contrôle et modélisation d'expertise

Après avoir introduit par un exemple les notions importantes de la théorie du contrôle et des SED, il s'agit à présent de positionner mon travail dans le contexte de la commande des systèmes. Dans cette section, on présente les concepts de systémique et de théorie du contrôle permettant de raisonner sur la nature du travail de formalisation d'un POD conçu à base d'expertise.

2.2.1 Système

Le dictionnaire en ligne « le trésor de la langue française informatisé » (TLFI, 2008) in (Grastien, 2005, p.5) définit un système comme :

[...] un ensemble dont les parties sont interconnectées et échangent [...] de la matière, de l'énergie ou de l'information (définition C.1).

in : Grastien (2005, p.5)

Cette définition décrit bien la nature d'un système mais n'aborde pas un aspect important : l'ambiguïté de la notion de système. Cette ambiguïté est mise en exergue par Jean Ladrière dans l'article pour l'encyclopédie universalis (Ladrière, 2008, p.1029-1030) :

La notion de système apparaît dans deux catégories de contexte fort différentes : d'une part, lorsqu'il est question de propositions (dans lesquelles sont exprimées des relations formelles ou des conceptions relatives à la réalité), d'autre part, dans des contextes où interviennent des entités d'une certaine espèce (par exemple, des corps matériels ou des organismes vivants), dont on étudie la structure et l'évolution. Dans les contextes du premier type, « système » est à peu près synonyme de « théorie » (du moins si l'on prend ce dernier terme en un sens très général). Dans ceux du second type, les considérations qui mettent en jeu la notion de système ont été généralisées dans le cadre de la théorie des systèmes [...] [Cette théorie] s'efforce d'établir le cadre le plus général à l'intérieur duquel on peut étudier le comportement d'une entité complexe analysable, c'est à dire son évolution au cours du temps.

in : Ladrière (2008, p.1029-1030)

Cet extrait met en lumière deux points importants. (i) Les systèmes dynamiques ont un comportement analysable dans le temps ; temps qui peut être défini continu ou discret. L'existence d'un temps discret introduit la notion d'observateurs procédant à un échantillonnage. On questionnera la présence de l'observateur d'un système après avoir illustré (ii) le fait qu'il existe des systèmes réels (physique) qu'on associe à la définition de Grastien (2005) et des systèmes dits formels (systèmes logico-mathématiques) qui sont des oeuvres de l'esprit possédant une cohérence interne. Ces derniers peuvent servir de représentation intelligible des premiers. C'est dans ce contexte de modélisation d'un système réel par un système formel que se pose la question de la finalité du modèle.

Un système est généralement étudié comme une entité dans la mesure où son comportement ne peut être expliqué par l'analyse du comportement de ses composantes. C'est pour répondre à cette lacune de l'approche analytique que fut introduite l'approche cybernétique.

En proposant, dès 1943, [...] de reconnaître la légitimité scientifique de l'interprétation téléologique *a priori* du comportement d'un système, Wiener autorisait une voie alternative à toute entreprise de modélisation scientifique ; au lieu de chercher d'abord les causes (mécaniques), le modélisateur était invité à s'interroger d'abord sur les finalités ou les projets du système étudié : en mettant en correspondance intelligible les comportements du système avec sa ou ses finalités, le modèle permet de le décrire effectivement, par simulation d'une boîte noire, par isomorphie fonctionnelle. L'ignorance des causes mécaniques ne constitue plus l'obstacle infranchissable à la modélisation intelligible du phénomène considéré.

in : Lemoigne (2008, p.1033)

Ainsi cette conception de la modélisation place le modélisateur au centre de l'arène, avec non plus comme mission unique d'en comprendre les mécanismes internes, mais d'étudier les propriétés (par exemple stabilité, périodicité, atteignabilité) du comportement du système vu comme une boîte noire ayant une finalité. Il s'agit de définir ses

variables d'entrée et de sortie et d'en construire un modèle mathématique simulant le comportement (Klein, 2005).

Définition 4. *Un système est un objet d'étude défini par rapport à un environnement composé d'éléments (ses composants) interconnectés, discernables ou non, réels ou abstraits. Le système possède des propriétés et un comportement dynamique propre. Les interactions du système avec l'environnement (système ouvert) et les évolutions de ses composants (système complexe) conditionnent son comportement.*

2.2.2 Etat

Dans le cadre d'un système vu comme une boîte noire, c'est à dire dont on ignore la mécanique (physiques, biologique, . . .) interne du comportement, la notion d'état permet d'identifier la situation du système à un instant donné.

Précisons ce qu'est un état. On a défini que le système pouvait être en interaction avec son environnement c'est à dire recevoir ou émettre de l'information. On a également précisé que le système était constitué de composants. Un composant doit être compris comme un sous-système lui-même éventuellement composé de ses propres sous-systèmes. Bien qu'inobservables sous hypothèse de la boîte noire, les composants ont des comportements qui s'agrègent et donnent lieu à une évolution endogène de l'état (global) du système. Formellement, l'espace d'états X du système S est défini comme suit :

Définition 5. *Soit $S = \{\Sigma, O, I\}$ un système avec :*

Σ : l'ensemble des entrées,

O : l'ensemble des sorties,

I : l'ensemble des vecteurs $\vec{v}$ de dimension n des états des n composants de S où, $\vec{v}$ représente une combinaison de l'état courant de chaque composant et $n \in \mathbb{N}$

On définit alors $\eta_{nat} = (T, C)$ l'ensemble des états naturels de S où, $C : \Sigma \times O \times I$ est l'ensemble des configurations possibles et T l'ensemble des instants.

Pour faciliter la manipulation du concept d'état, on préférera X l'espace symbolique des états issus de la projection $P : T \times C \longrightarrow X$ qui à chaque couple $(t, c_i) \in \eta_{nat}$ associe un élément de $x_i \in X$ tel que $P(t, c_i) \mapsto x_i$.

Remarque : la définition 5 est récursive puisque l'état du système dépend de celui de ses n composants si $n > 0$. Un état x_s est donc « équivalent » à un t-uplet $(t, \sigma, o, \vec{v}_t)$ avec

$t \in T, s \in \Sigma, o \in O, \vec{v}_t \in I_t, I_t$ une cellule de la partition I/T . Précisons que cette définition reconnaît la possibilité d'une absence d'information que l'on notera ϵ avec $\epsilon \in (\Sigma \cap O)$. Ici *information* prend un sens très large puisqu'elle désigne la nature des éléments de Σ et O . Cela peut être un évènement, la valeur d'une variable, de l'énergie ou encore une voiture entrant dans le système parking. . .

2.2.3 Modélisation

Les définitions données ci-dessus envisagent le système et ses états comme des entités « en soi ». Pour autant, lorsque le système atteint un certain degré de complexité,

il s'agit de pouvoir *l'observer* pour pouvoir le connaître. Par connaître, on entend organiser et représenter les faits de manière cohérente. Dans l'approche cybernétique, cette connaissance est complète lorsqu'on est capable de construire un modèle permettant de *simuler le comportement* du système.

Définition 6. *Le comportement d'un système S , noté^c BEH_S , est l'ensemble des suites d'états θ , que le système peut effectivement visiter.*

C'est l'ensemble des branches d'un arbre partant de l'état initial $x_0 = P(c_{ini}, \min(T))$, dont chaque noeud est un état $x_k \in X$ et dont les feuilles terminales sont les états $x_{fol} = P(c_{\max(T)}, \max(T))$ avec $\min(T)$, $\max(T)$ respectivement le début du temps et la fin du temps (du système) ; et c_{ini} l'unique configuration initiale du système et $c_{\max(T)}$ une configuration possible à $\max(T)$. Cette définition est librement inspirée de (Klein, 2005, p.24).

Au début de l'étude d'un système totalement inconnu (par exemple une nouvelle maladie), on ne sait pas déterminer dans l'environnement les éléments qui sont en entrée, on ne sait également rien des interactions au sein du système qui génèrent les sorties. On peut faire l'hypothèse raisonnable qu'un certain nombre de sorties sont observés, ce qui motive l'étude du système. Pour illustrer notre propos, prenons l'exemple d'une nouvelle maladie (un nouveau pathosystème), il faut d'abord identifier les dégâts qu'elle cause (1^{er} type de sortie), puis on apprend à identifier des symptômes (2nd type de sortie). . . Un système aussi incomplètement défini n'est pas simulable. Les étapes préliminaires à la modélisation consistent donc à identifier les entrées et sorties pertinentes, les moyens de les évaluer ainsi que l'opportunité d'étudier les composants du système.

Admettons à présent que S soit une boîte grise c'est à dire que sa composition interne ne soit que partiellement comprise : *tous ses composants (leurs comportements, leurs interactions) ne sont pas bien connus ; ou leurs états ne peuvent être observés à chaque instant.* En pratique on est souvent confronté aux deux limitations en même temps. D'ailleurs la limite concernant « l'observabilité » à chaque instant peut dans bien des cas être étendue aux informations en entrée et en sortie. De telles limitations imposent une restriction sur l'espace d'états. On n'a en pratique accès qu'à X_{obs} l'espace des états observés.

Définition 7. *A partir de $T_{obs} \subseteq T$ les instants d'observation et $C_{obs} \subseteq C$ les configurations observées de S . On définit $X_{obs} = P(T_{obs}, C_{obs})$ l'espace des états observés avec $X_{obs} \subseteq X$.*

Remarque : *L'ensemble des états non-observés $\overline{X}_{obs}$, englobe aussi bien les états qui n'appartiennent pas au comportement BEH_S (définition 6), que ceux qui n'ont pas été vus faute d'avoir été observés à l'instant de leur occurrence, ou encore les états dont la configuration a été mal interprétée (par exemple si une variable n'est pas mesurée). Une description peut être incomplète par défaut de connaissance ou par impossibilité d'en faire la mesure.*

Remarque : *La définition ci-dessus des " états observés " ne doit pas être confondue avec la notion d'observabilité d'un système qui est évoquée plus loin et concerne les séquences d'état.*

c. BEH pour « behaviour ».

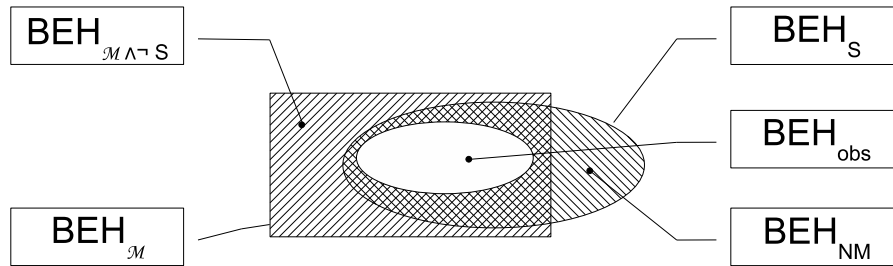
A partir des états observés, le travail du modélisateur est donc de construire un modèle, c'est à dire une carte mettant en relation cohérente les états observés afin de simuler les évolutions du système de manière aussi complète que possible.

Définition 8. Le modèle $\mathcal{M} = (X_{\mathcal{M}}, R)$ avec $R \subseteq X \times X_{\mathcal{M}}$ une relation totale construite à partir des observations telle que pour chaque $x \in X$ les états suivants possibles sont donnés par R . On a : $X_{obs} \subseteq X_{\mathcal{M}} \subseteq X$ avec X_{obs} l'ensemble des états observés du système et $X_{\mathcal{M}}$ le sous-ensemble de X que R permet d'atteindre à partir de X_{obs} .

On dit que $\mathcal{M}$ modélise le système S : noté $\mathcal{M} \models S$, si $\mathcal{M}$ simule S . Un modèle simule un système si à partir d'une même configuration initiale, le modèle et le système parcourent la même suite d'états, lorsqu'ils sont soumis aux mêmes entrées. Formellement on a :

Définition 9. On dira que le modèle $\mathcal{M}$ simule le système S si le comportement $BEH_S \subseteq BEH_{\mathcal{M}}$ avec BEH_S l'ensemble des comportements de S (voir définition 6) et $BEH_{\mathcal{M}}$ l'ensemble des comportements du modèle.

Rappelons que BEH_S n'est a priori pas observable. Le modélisateur ne dispose en réalité que de BEH_{obs} . La difficulté de la modélisation consiste comme le montre la figure 2.2 à simuler si possible l'intégralité de BEH_S par $BEH_{\mathcal{M}}$ avec, selon les objectifs de la modélisation, parfois la nécessité de minimiser $BEH_{\mathcal{M} \wedge \neg S}$ la part du comportement du modèle qui ne correspond pas au comportement du système.



source : Klein (2005, p.25)

BEH_S	le comportement du système S .	BEH_{obs}	le comportement observé de S .
BEH_{NM}	le comportement de S Non Modélisé.		
$BEH_{\mathcal{M}}$	le comportement du modèle $\mathcal{M}$	$BEH_{\mathcal{M} \wedge \neg S}$	le comportement de $\mathcal{M}$ ne correspondant pas à S .

FIGURE 2.2 – Relations entre le comportement complet du Système, le comportement observé et celui du modèle.

2.2.4 Contrôle

Introduisons à présent, la théorie du contrôle^d. Son objectif est d'influencer l'état d'un système par des commandes/contrôles de façon à ce que le système conserve des propriétés souhaitées grâce à un retour d'information sur l'état du système (on parle de *feed-back* Macki and Strauss, 1982). Il peut également s'agir d'influer sur le système

pour lui faire acquérir ces propriétés (*feed-forward*). La figure 2.3 illustre ces deux types de boucles de contrôle.

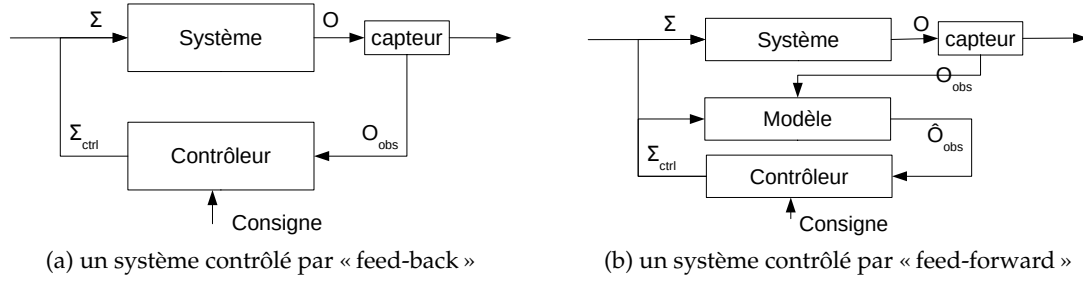


FIGURE 2.3 – Deux types de contrôleur en boucle fermée avec le système

2.2.4.1 Synthèse idéale de contrôleur

Dans le cadre de modélisation que nous avons défini plus haut, le principe de la synthèse de contrôleur est de spécifier une propriété sur le système S , de produire une partition de l'espace d'état selon que la propriété est réalisée ou non. Il s'agit ensuite de définir un système contrôleur C tel que le système couplé au contrôleur : SC , ne puisse atteindre que les états satisfaisants la propriété. On notera $\mathcal{T}$ (pour target : objectif) le sous-ensemble de X pour lequel la propriété désirée est valide et on appelle comportement spécifié (BEH_{spec}), le comportement dont toutes les suites d'états θ appartiennent à $\mathcal{T}$ **Remarque :** Rappelons que X est un couple : (une configuration C et un instant t)

aussi si la consigne était que le système atteigne un régime stable en 5 seconde, tous les états où le temps est inférieur à 5 $X_{<5}$ seraient des éléments de $\mathcal{T}$ c'est à dire $X_{<5} \subset \mathcal{T}$.

On génère $\mathcal{M}_C$ tel que $\mathcal{M}_S \wedge \mathcal{M}_C = \mathcal{M}_{SC} \models \mathcal{M}_{spec}$

avec $\mathcal{M}_{spec} \models BEH_{spec},$

$\mathcal{M}_S \models BEH_S$

et $\mathcal{M}_C \models BEH_C,$

où $BEH_{spec} = \{\theta | \forall x \in \theta, x \in \mathcal{T} \wedge \theta \in BEH_S\}$

et $BEH_{SC} = \{\theta | \theta \in BEH_C \wedge BEH_S\}$

La difficulté du couplage se situe premièrement dans la question de savoir s'il est possible de contrôler le système et par quel biais, mais également de trouver le modèle de C qui permette de garantir que le système satisfait à la *spécification* également appelée la *consigne*.

En théorie du contrôle, la notion d'observabilité concerne la capacité à reconstruire le comportement du système sur une période donnée, à partir d'observations sur les entrées et sorties sur cette période. Voir dans le cas continue discrétisé (Borne, 1993) et pour celui des SED (Lin and Wonham, 1988) La notion duale de l'observabilité est la contrôlabilité (commandabilité). Il s'agit donc intuitivement de la capacité à mener un système dans un état souhaité, à partir d'un état initial, en agissant sur certaines entrées, ceci en un temps finis.

d. aussi appelée théorie de la commande en Français

2.2.4.2 Synthèse de contrôleur en pratique

En pratique, cette définition est souvent suffisante si l'état initial appartient à C . En boucle fermée (cf. fig. 2.3) le contrôle peut être synthétisé si le système est observable et contrôlable à partir de l'état initial. Le contrôleur C prend alors ses entrées dans O_{obs} les sorties observées et produit ses sorties appelées contrôle dans Σ_{ctrl} .

Il n'est pas forcément nécessaire de disposer d'une représentation parfaite du système pour pouvoir réaliser un contrôleur. En réalité en face d'un objectif, il faut être capable de distinguer l'intégralité des états de $\mathcal{T}$ et surtout les conditions qui conduisent à $\overline{\mathcal{T}}$ l'ensemble des états hors de l'objectif. Il est suffisant d'avoir une modélisation partielle du système permettant l'observation de la perte de la consigne (sortie de $\mathcal{T}$) et explicitant les moyens d'action permettant de restaurer cette consigne c'est à dire $x_{\overline{\mathcal{T}}} \succ_{\sigma_{ctrl}} x_{\mathcal{T}}$ pour pouvoir contrôler le système.

Dans le monde réel le contrôle est *contraint*. D'une part, les contraintes physiques du système, ne permettent pas de réaliser tous les contrôles mathématiquement possibles sans mettre en péril le système. D'autre part, les dérives (le fait de sortir de l'objectif) prennent en général du temps avant de se répercuter sur les sorties. Dans ce cas, si la consigne est impérative, il faut pouvoir anticiper, à partir des entrées que le système a subies, l'évolution future. C'est dans ce cas que l'on met en oeuvre l'approche feed-forward qui utilise un modèle d'évolution du système afin de permettre au contrôleur de corriger une dérive avant qu'elle ne se produise (cf. fig. 2.3(b)).

Il peut également être nécessaire de mettre en oeuvre un modèle d'évolution du système dans la boucle lorsque la capture des sorties est, soit impossible, soit coûteuse et que le pas de temps entre deux mesures est supérieur à celui de la dérive. Dans ce cas un contrôle plus fréquent que la mesure est nécessaire. Il faut noter que si le système est contrôlable sur une large plage d'états autour de $\mathcal{T}$ et que l'on peut autoriser et corriger ces dérives, alors l'emploi en feed-forward d'un modèle ne se justifie pas.

On a présenté ci-avant, les notions de systémique et de théorie du contrôle indispensables à la compréhension du problème de contrôle à traiter et au choix des outils efficaces pour valider le modèle de [POD](#).

2.2.5 Une approche du contrôle à base d'expertise

On positionnera à présent ce travail de modélisation et de conception de [POD](#) dans le cadre de la théorie du contrôle et on expliquera le recours à l'expertise.

Le problème de protection du vignoble contre le mildiou et l'oïdium présente plusieurs difficultés en terme de contrôle. La dérive du système de production ne révèle ses effets que tardivement si on considère la présence de symptômes comme marqueur d'un niveau d'épidémie donné. En effet entre l'instant d'une contamination et le moment où cette contamination est perceptible, il y a incubation pendant environ une semaine. Ce décalage entre l'évènement à contrôler et le moment où cet évènement devient perceptible empêche un contrôle en feed-back au sens strict. En outre la prise de mesure (évaluation du niveau d'épidémie) ne peut être automatisée à l'heure actuelle, ce qui la rend extrêmement coûteuse.

Par ailleurs une dérive par rapport à la trajectoire idéale (absence de maladie) est difficile à corriger. Au mieux il est possible de stabiliser cette dérive (bloquer l'épidémie à un niveau donné). Cette irréversibilité des dégâts impose une intervention préventive avant la contamination, ceci d'autant plus qu'on ne sait pas, à l'heure actuelle, estimer les conséquences d'une dérive (c'est à dire faire le lien entre un niveau d'épidémie et les pertes engendrées). Dit autrement, les seuils d'interventions permettant d'éviter les états interdits ne sont pas définis.

Dans ce contexte, si les objectifs de production sont : « aucun symptôme et aucun dégât », la pratique traditionnelle consistant à traiter tout au long de la saison en prévention d'une éventuelle contamination, est relativement rationnelle. Néanmoins aujourd'hui, la consigne de ce contrôleur doit évoluer (plan Ecophyto 2018, [Paillet, 2008](#)). L'objectif fixé par Santé végétale est de n'avoir aucune perte économique, d'autoriser quelques symptômes et ceci avec le moins d'opérations de contrôle possible.

Dans l'idéal, le contrôle des épidémies le plus économe en traitement^e s'effectuerait au niveau de chaque plante : cela nécessiterait de disposer d'un modèle épidémiologique valide qui permettrait, en fonction des conditions climatiques et micro-climatiques du cep ainsi que du niveau actuel d'infestation, de décider d'un traitement du cep sur la base (i) de prévisions d'évolution des conditions climatiques (ii), des niveaux d'infestation qu'engendrent ces prévisions et (iii) de fonctions de dégâts permettant à chaque instant de relier un niveau d'infestation aux pertes attendues. Ce contrôle idéal prendrait schématiquement la forme présentée en fig. 2.3(b).

Pourtant, force est de constater qu'à l'heure actuelle les moyens techniques ne permettent pas de mettre en oeuvre ce type de solution. Les modèles utilisés pour le conseil sont des modèles stochastiques prenant en entrée des données climatiques (par exemple les modèles du [SRPV Rouzet and Jacquin, 2003](#)). Cependant, ils sont calibrés et calculés à une échelle « macroscopique » (« petite région ») qui ne rend pas compte nécessairement de l'état d'un système de production particulier (la parcelle).

L'expérience des phytopathologistes de Bordeaux est particulièrement édifiante à ce sujet. Les parcelles sur lesquelles les expérimentations ont été menées de 2001 à 2006 se situent toutes sur des sites de l'[INRA](#) dotés de stations météorologiques permettant de calculer les sorties pour chacun des modèles évoqués. Il est pourtant arrivé à plusieurs reprises que les modèles soient alarmistes alors qu'aucune épidémie n'était constatée (le cas inverse est probablement possible bien que cela ne nous ait pas été rapporté).

Les modèles de prévisions doivent donc être considérés comme trop pessimistes par rapport à une consigne, qui vise des objectifs de production exigeants en terme de qualité et de quantité, mais ne doit pas effectuer d'opérations de traitement inutiles.

Pour cela, les phytopathologistes ont mobilisé les concepts de dégâts, de dommages et (dans une moindre mesure) de pertes (présentés au chapitre 1, section 1.2.1). Ils se

e. Nous sommes bien conscient que la mise au point de plantes résistantes (hybride ou OGM) ou la découverte d'agents (insectes, microbes...) permettant un contrôle biologique efficace, seraient des solutions ayant un impact plus direct sur le problème des pesticides que nos propositions, au moins en terme de pollution. Pour autant, aucune de ces possibilités n'est d'actualité.

sont inspirés des principes de la PIC : « il n'est pas nécessaire de chercher à éradiquer un pathogène (c'est d'ailleurs souvent illusoire), mieux vaut le contenir en dessous d'un seuil où celui-ci ne cause pas de perte de revenu ». Une approche à base d'expertise a donc été adoptée.

Pour la conception, ils utilisent leurs expertises pratiques et scientifiques comme s'il s'agissait d'un modèle *feed forward* du comportement du système et produisent à partir d'une situation donnée, une projection raisonnable de dommages à la récolte. Le résultat de ces projections sert *ex ante* à construire une partition qualitative de l'espace d'état du pathosystème en fonction des risques de perte estimés. A partir de cette partition, ils ont construit les bases du système de décision que nous avons modélisé. Le modèle encapsule *in fine* (i) l'expertise permettant de faire les projections et (ii) les actions à effectuer pour ne pas atteindre les états dangereux. La figure 2.4 représente schématiquement la manière dont le POD Mildium permet de contrôler le pathosystème viticole.

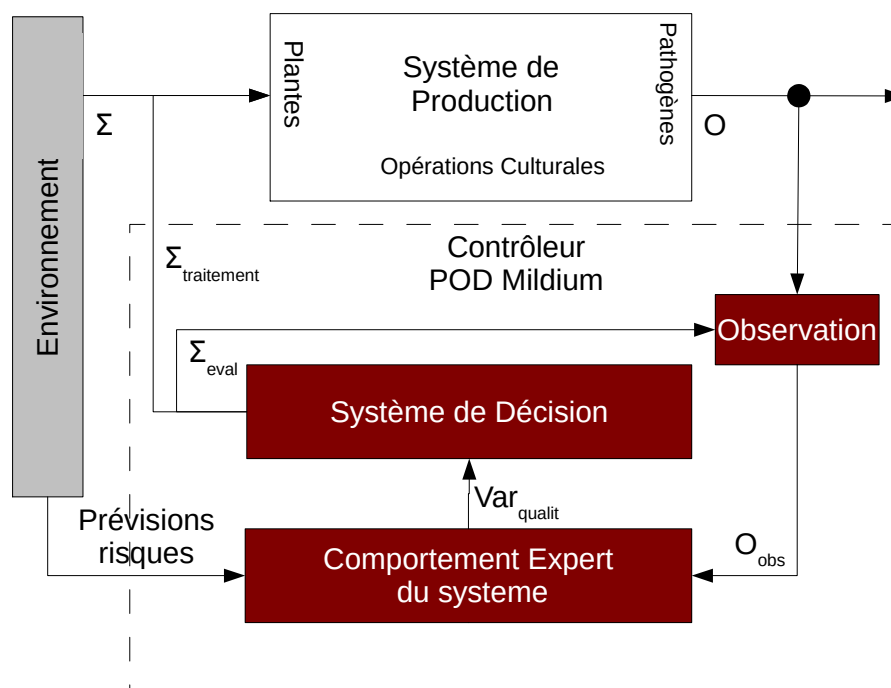


FIGURE 2.4 – Le problème de contrôle du mildiou et de l'oïdium tel que résolu par le POD Mildium.

Précisons le but des expérimentations de plein champ. On l'a vu, l'expertise est utilisée pour construire une partition des situations épidémiques en fonction du risque de dommage à la récolte. Cette partition est opérationnelle au sens où elle vise à prendre des décisions de contrôle sur le système. Il s'agit donc d'une partition qui (en simplifiant le raisonnement) établit *in fine* des seuils d'intervention, sur la base d'une fonction de dommage experte. Ces seuils restent à affiner et à valider par l'expérimentation.

En outre le positionnement de ces mesures est déclenché par le système de contrôle (voir fig. 2.4) sur la base d'évaluation de la phénologie (nous y reviendrons au chapitre 5) et du découpage en séquence du POD. On a donc une estimation des risques de dommages qui est fortement liée au contrôleur lui-même.

Notre modélisation doit donc représenter le système de décision expert. On verra au

chapitre 6 que notre travail de validation du modèle a consisté à vérifier que $BEH_{Experts} \subseteq BEH_{Mildium}$ de sorte que $MODÈLE_{Mildium} \models Experts_{Mildium}$, c'est à dire à valider que le modèle formel du **POD** Mildium permet bien de reproduire les décisions du « **POD** Mildium expert » mises en œuvre par les experts au cours des expérimentations. Dans la suite et jusqu'au chapitre 6, on ne fera pas la distinction entre le « modèle du **POD** » et le **POD** expert..

2.2.6 Conclusions

Avant de poursuivre, revenons sur la distinction système réel/système formel. On a montré plus haut que notre travail se pose comme un problème de contrôle discret sur un système hybride. On a montré pourquoi l'approche par synthèse optimale du contrôleur était impraticable, justifiant l'utilisation de l'expertise, pour aboutir à un « système contrôleur » opérationnel sur le système de production viticole. Ainsi, le contrôleur est le système que nous étudions.

On précisait au début de cette section qu'un système peut être un objet logico-mathématique possédant une cohérence interne que l'on pourrait appeler un modèle. L'un des objectifs principaux de notre travail est de construire ce système par l'explicitation et la mise en cohérence des connaissances expertes.

A partir d'un protocole de décision informel et de règles de décision spécifiées de manière incomplète, il s'agit de réaliser un modèle capable de traiter l'ensemble des cas de figure pouvant se réaliser dans l'espace d'états du système de production exprimé par l'expertise. Pour réaliser ce « système contrôleur » (on parlera par la suite simplement du système), on utilise le formalisme des **SED** qui est bien adapté au type de commande binaire qu'est la décision d'une application phytosanitaire.

2.3 Fondements théoriques des systèmes à évènements discrets

[Selon Ramadge and Wonham (1989)], un Système à Évènements Discrets (**SED**) est un système dynamique qui évolue conformément à la brusque occurrence d'évènements physiques, selon des intervalles irréguliers potentiellement inconnus.

in : Ramadge and Wonham (1989)

Prenant un point de vue de modélisateur, ces auteurs précisent :

Un **SED** [est] doté d'un espace d'états discrets, dont les trajectoires d'états sont constantes par morceaux ; les instants auxquels les transitions d'un état à un autre ont lieu ainsi que les transitions elles-mêmes sont en général imprévisibles. [...] Les transitions d'états d'un **SED** sont appelées évènements. [...]

Une hypothèse simplificatrice communément faite est d'ignorer les instants d'occurrence des évènements et de considérer seulement l'ordre dans lequel ils ont lieu. Cela donne lieu à ce que l'on appelle un *modèle SED logique*. [Par la suite on dira **SED** pour **SED** logique]

in : Ramadge and Wonham (1989)

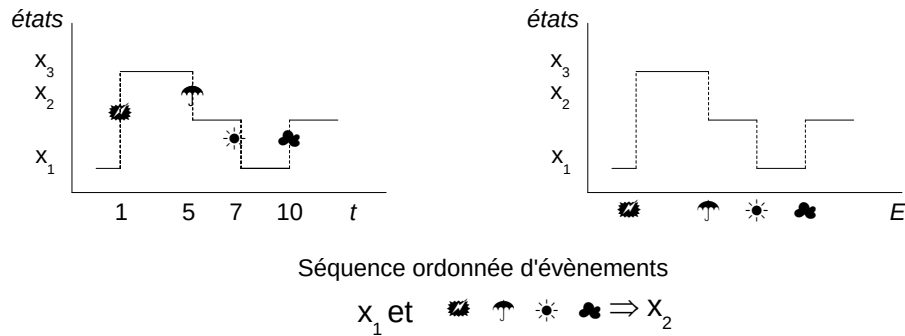


FIGURE 2.5 – L'évolution de l'état d'un SED dans le temps se résume par une séquence d'évènements à partir d'un état initial.

Ainsi, le comportement d'un SED est fondamentalement régi par des évènements (fig. 2.5) c'est à dire que tant qu'aucun évènement n'a eu lieu, son état reste inchangé, à la différence des systèmes continus (pour un SED, « le temps ne change rien à l'affaire »).

On considère ici qu'un évènement est un message, une information, qui peut éventuellement entraîner une évolution de l'état du système. Un évènement n'a pas de durée. Dans le cadre de la théorie linguistique des automates on fait l'hypothèse qu'il est toujours possible d'ordonner deux évènements^f. Tout se passe (se calcule) *comme si* il y avait toujours un intervalle de temps $\delta t > 0$, même infime, entre deux évènements $\downarrow_1$ à l'instant t_1 et $\downarrow_2$ à l'instant t_2 , tels que $t_2 - t_1 \geq \delta t$. Cette hypothèse permet de construire des séquences d'évènements en dehors de toute référence au temps. Faire abstraction du temps (comme quantification de la durée) est pratique d'un point de vue théorique, mais ne permet pas de représenter tous les problèmes, aussi le temps peut-il être réintroduit dans le cadre des SED par des formalismes dit temporisés (automates temporisés (Alur and Dill, 1994) par exemple). Précisons encore, que toutes les occurrences d'un même type d'évènement ne causent pas nécessairement de transition d'un état vers un autre, mais qu'un même type d'évènement peut être la cause de diverses transitions.

Finalement, on doit introduire la distinction entre les évènements *exogènes*, provenant de l'environnement du système et les évènements *endogènes* générés par le système lui-même. On note E l'ensemble de évènements tel que $\forall \downarrow, \downarrow \in E$. On définit E_{in} le sous-ensemble des évènements exogènes, $E_{in} \subseteq \Sigma$ (Σ est l'ensemble défini à la def. 5) et on définit E_{out} où $E_{out} \subseteq O$ (def. 5) l'ensemble des évènements endogènes émis par le système. Si le système est un pur SED, on a $E \supseteq \Sigma \cup O$, c'est à dire que l'état du système n'est déterminé que par des évènements en entrée ou en sortie.

Cette représentation d'un système dont les états ne seraient régis que par les évènements en entrée et en sortie, n'est valide vis à vis de la définition du système : $S = (\Sigma, I, O)$, que si les évènements ne sont pas dirigés d'une origine vers une destination déterminée. S'ils peuvent agir à la fois sur les composants du système tout en étant perçus de l'extérieur du système (on parle de *broadcast*, diffusion en Français) alors $S = (\Sigma, I, O)$ est cohérent avec $E \supseteq \Sigma \cup O$ dans le cadre des SED. Dans de nombreux cadres d'analyse, les évènements ont une origine et une destination, ce qui est intéressant pour étudier le

f. Toutefois d'autres cadres sémantiques SED modélisent les évènements synchrones.

comportement des canaux de communication ou formaliser les systèmes concurrents et asynchrones. On ne présente pas ces cas de figure puisque, pour notre travail, on utilise des évènements diffusés à travers tout le système.

La notion d'évènement permet donc d'identifier les instants d'évolution de l'état du système et peut aussi être associé à la notion d'entrée et de sortie d'un SED. En fait, ce qui importe pour mon travail, c'est que les évènements sortant soient aussi perçus par les composants. Ce qui est le cas on le verra pour les Statecharts (voir section 2.6).

2.4 Automates

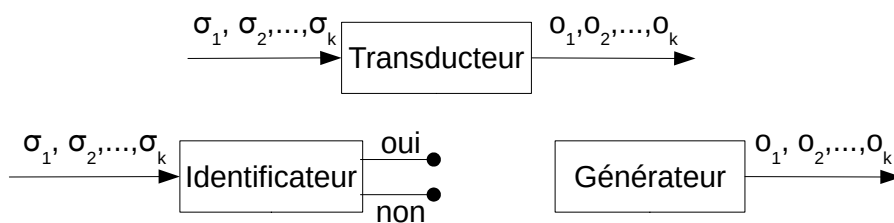
On présente dans cette section quelques éléments théoriques sur les automates qui permettent d'appréhender les fondements de l'analyse formelle des Statecharts. Il nous semble utile de préciser que ces notions ne sont pas indispensables à la lecture intuitive du Statechart du POD Mildium (présenté au chapitre 5).

Trois types de SED sont à distinguer, chacun donnant lieu à une structure d'automate différente (fig. 2.6).

Les *identificateurs* (voir section 2.4.1) résolvent un problème de décision en permettant d'identifier si une chaîne de caractère appartient au langage défini par l'accepteur.

Les *générateurs* sont des modèles de SED ne recevant aucune entrée et qui produisent en sortie les mots des langages qu'ils définissent. Ils sont notamment utilisés dans la théorie du contrôle des SED (théorie RW in Ramadge and Wonham, 1989; Wonham, 2008), pour modéliser le comportement du système à contrôler. Pour le contrôle on adjoint au générateur un contrôleur, qu'il s'agit de définir, dont l'objectif est d'interdire au générateur d'atteindre les états dangereux. Le contrôleur y parvient en empêchant l'occurrence des évènements (parmi les évènements contrôlables) qui permettraient au générateur d'atteindre les états interdits. Cela signifie par exemple que le contrôleur devra générer un évènement qui mette la machine dans l'état maintenance avant que l'évènement « casse » ne la mette dans l'état « en panne ».

Les *transducteurs* réagissent à un flux d'entrée qui entraînent le changement de leurs états en conséquence de quoi ils émettent des symboles en sortie. Il existe deux types d'automates pour représenter les transducteurs respectivement appelés machine de Moore et machine de Mealy (voir section 2.4.2).



source : Klein (2005)

FIGURE 2.6 – Trois types de SED selon Booth

2.4.1 Identificateur canonique (*canonical recognizer*)

Les définitions qui suivent sont tirées principalement de [Wonham \(2008\)](#).

Un SED dans le contexte de la boîte noire peut être vu comme une suite d'évènements en entrée et une suite d'évènements en sortie. La théorie des langages est souvent utilisée pour modéliser les SED. Pour cela, il suffit d'associer à chaque type d'évènement ζ_i , un symbole σ_i de l'alphabet $\mathcal{A}$.

On définit donc la fonction $Lab_{ev} : E \mapsto \mathcal{A}$ tel que $\zeta_i \xrightarrow{Lab_{ev}} \sigma$ avec $\zeta_i \in E$, E l'ensemble fini des types d'évènements auxquels est soumis le SED S et $\mathcal{A}$ l'ensemble fini des symboles $\sigma, \tau, \dots$. $\mathcal{A}$ est l'alphabet de S .

On définit W^- l'ensemble des mots (chaînes de caractères ou chaîne) composés d'une suite finie s de caractères $\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_i\cdots\sigma_k$ avec $k \geq 1$ et $\sigma_i \in \mathcal{A}$; ici ϵ représente le mot vide, $\epsilon \notin \mathcal{A}$. On définit alors

$$W := \{\epsilon\} \cup W^-$$

L'identificateur canonique peut être défini de la manière suivante :

Définition 10. *Un identificateur canonique est un 5-uple*

$$\mathbf{R} = (X, \mathcal{A}, \hat{\xi}, x_0, X_m)$$

où, X est l'ensemble des états de $\mathbf{R}$,

$\mathcal{A}$ l'alphabet pour lequel est défini $\mathbf{R}$,

$\hat{\xi} : X \times W \longrightarrow X$ la fonction de transition qui à chaque état définit ses successeurs,

x_0 un état initial,

X_m l'ensemble des états acceptants ou états finaux.

Cette structure identifie les états successif à partir des symboles « qu'on lui soumet ». On est alors capable de suivre le comportement qu'induit une chaîne s en entrée sur le graphe de l'espace d'état que construit la structure $\mathbf{R}$.

Définition 11. *Un Langage L sur l'alphabet $\mathcal{A}$ est un sous ensemble de W . L est un élément de l'ensemble $\emptyset \cup W$ où $\emptyset$ est le langage sans mot.*

Pour les identificateurs canoniques, on a donc $BEH_{\mathbf{R}} = W$ et $BEH_{\mathbf{R}_m}$ le sous-ensemble des comportements de $\mathbf{R}$ dont les sommets terminaux $x \in x_m$, sont composés de θ_m , où $\theta_m \equiv s$ avec $s \in L$. On dit que $\mathbf{R}$ définit une *grammaire* de L .

Définition 12. *Soient $\mathbf{R}_1 = (X_1, \mathcal{A}_1, \hat{\xi}_1, x_{0_1}, X_{1_m})$ et $\mathbf{R}_2 = (X_2, \mathcal{A}_2, \hat{\xi}_2, x_{0_2}, X_{2_m})$ deux identificateurs. Le produit $\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \parallel \mathbf{R}_2$, en imposant $X_1 \cap X_2 = \emptyset$, est l'identificateur $(X, \mathcal{A}, \hat{\xi}, x_0, X_m)$ avec :*

- X les états résultant du produit cartésien de X_1 et X_2 c'est à dire $X = X_1 \times X_2$
- $\mathcal{A}$ l'alphabet est l'union des alphabets $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ c'est à dire $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \cup \mathcal{A}_2$.
- $\hat{\xi}$ l'ensemble des transitions de $\mathbf{R}$ ainsi, avec $\hat{\xi}_{1_i} = (x_1, s_1, x'_1) \in \hat{\xi}_1$ et $\hat{\xi}_{2_i} = (x_2, s_2, x'_2) \in \hat{\xi}_2$:
- si $s_1 = s_2$, alors $((x_1, x_2), s_1, (x'_1, x'_2)) \in \hat{\xi}$,
- si $s_1 \neq s_2$, alors $((x_1, x_2), s_1, (x'_1, x'_2)) \in \hat{\xi}$ ainsi que $((x_1, x_2), s_2, (x_1, x'_2)) \in \hat{\xi}$.
- x_0 l'état initial, est le produit cartésien des deux états initiaux X_{1_m} et X_{2_m} c'est à dire $x_0 = (x_{1_0}, x_{2_0})$
- X_m l'ensemble des états acceptants résultant du produit cartésien de X_{1_m} et X_{2_m} c'est à dire $X_m = X_{1_m} \times X_{2_m}$

L'identificateur global de deux langages est le produit des identificateurs de chacun des langages le composant (voir def. 12). Cette définition décrit le principe pour la structure la plus simple. Ce principe reste le même pour des structures plus complexes.

2.4.2 Transducteurs

Dans la section ci-dessus, on définissait $\mathbf{R}$ à partir d'un langage L . Ici, on considère à l'inverse, qu'une grammaire définit un langage. En d'autres termes, c'est le programme qui détermine les séquences d'actions possibles pour la machine. On présente des automates permettant de décrire une grammaire formelle, à la fois en entrée et en sortie.

2.4.2.1 Machines de Moore

Définition 13. Un automate de Moore $\mathbf{M}$ est un 6-uplet :

$$\mathbf{M} = (X, \Sigma, \xi, I, F, \mathcal{O}, \lambda)$$

avec :

- X : l'ensemble des états ;
- Σ : l'alphabet des entrées ;
- $\xi : X \times \Sigma \longrightarrow X$, la fonction de transition ;
- I : l'ensemble des états initiaux le plus souvent $I = \{x_0\}$;
- F : l'ensemble des états finaux ou acceptants ou marqués ;
- $\mathcal{O}$: l'alphabet des sorties ;
- $\lambda : X \longrightarrow \mathcal{O}$, la fonction qui associe une sortie à chaque état.

une machine de Moore associe à chaque état, un symbole $o \in \mathcal{O}$ où $\mathcal{O}$ est un alphabet. N.B. $\mathcal{O}$ n'est pas nécessairement différent de Σ . Les symboles $o_1, o_2 \dots o_n$ associés à chaque état sont déterminés par la fonction λ .

Remarque : L'identificateur canonique défini par def.10 est un cas particulier de l'automate de Moore avec $\mathcal{O} = \{0, 1\}$ et $\forall x \in X, \lambda(x) = 1$ ssi $x \in X_m$

Un automate se représente par un *diagramme d'états transition* : un graphe orienté où les sommets sont les états et les arcs les transitions. Prenons l'exemple de $\mathbf{Mo}$ défini de la manière suivante :

Le *diagramme d'états transitions* (ou simplement diagramme d'états) de la figure 2.7, est équivalent à la définition mathématique donnée à gauche. La flèche pointant sur l'état 1 indique que cet état est l'état initial. Les arcs entre les états 1 et 2 sont les transitions.

$\mathbf{Mo} = (X, \Sigma, t, X_0, F, \mathcal{O}, l)$ où

$$X = \{1, 2\}$$

$$\Sigma = \{\sigma, \kappa\}$$

$$t = \{(1, \sigma), 2\}, [(2, \kappa), 1]\}$$

$$X_0 = \{1\}$$

$$F = \{2\}$$

$$\mathcal{O} = \{o_1, o_2\}$$

$$l = \{(1, o_1), (2, o_2)\}$$

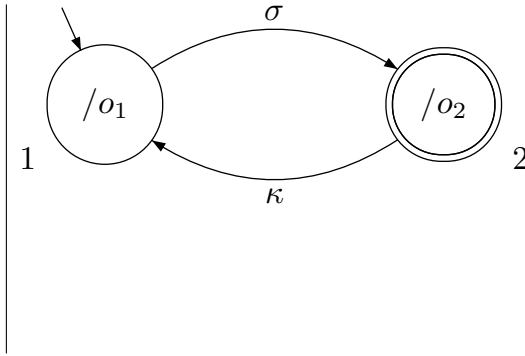


FIGURE 2.7 – Deux représentations de $\mathbf{Mo}$ un automate de Moore

A la transition est associé un *label* qui indique la condition nécessaire au franchissement de cette transition. Les *labels* respectivement σ et κ permettent d'identifier l'évènement déclenchant la transition. On parle généralement de *trigger* pour cet évènement déclenchant. Cette condition n'est pas suffisante puisqu'il faut que l'état à l'origine de la transition soit actif. L'état 2 est un état marqué (acceptant) qu'on identifie par un double cercle : $2 \in X_m$. Le langage reconnu par $\mathbf{Mo}$ en entrée est donc σ puis la suite infiniment dénombrable de κ suivie de σ noté $L_\Sigma : \sigma(\kappa\sigma)^*$. Il s'agit bien entendu du langage en entrée sur l'alphabet Σ .

Les automates de Moore sont des transducteurs, ils produisent des symboles (ou des évènements) en fonction de l'état dans lequel ils se trouvent. $\mathbf{Mo}$ produit donc de manière infiniment dénombrable les mots du langage $L_{\mathcal{O}}$ noté $L_{\mathcal{O}} : (o_1 o_2)^*$. Les symboles produits par $\mathbf{Mo}$ sont inscrits au centre du cercle représentant chacun des états. Ces symboles sont produits à l'instant où l'état devient actif. On aura noté qu'il n'y a pas d'équivalence entre le langage en entrée L_Σ et le langage en sortie $L_{\mathbf{Mo}}$. Bien entendu les alphabets étant disjoints, il ne peut y avoir d'égalité entre les deux mais plus profondément, il n'est pas possible de construire une projection de l'un dans l'autre. Les chaînes de caractères produites sur L_Σ permettent de reconstruire les transitions d'un état actif à l'autre, alors que les chaînes de $L_{\mathbf{Mo}}$, indiquent la succession des états atteints.

2.4.2.2 Machines de Mealy

Pour construire une machine qui informe (c'est-à-dire qui produise une sortie) non pas des états qu'elle atteint, mais de la séquence d'évènements qu'elle subit, il est nécessaire d'introduire à présent la machine de *Mealy*.

Définition 14. Un automate de Mealy $\mathbf{Y}$ est un 6-uplet :

$$\mathbf{Y} = (X, \Sigma, \xi, I, F, \mathcal{O}, \tau)$$

avec :

X : l'ensemble des états ;

Σ : l'alphabet des entrées ;

$\xi : X \times \Sigma \longrightarrow X$, la fonction de transition ;

I : l'ensemble des états initiaux le plus souvent $I = \{x_0\}$

F : l'ensemble des états finaux ou acceptants ou marqués

$\mathcal{O}$: l'alphabet des sorties

$\tau : X \times \Sigma \longrightarrow \mathcal{O}$, la fonction qui associe

une sortie à chaque couple : état, symbole d'entrée.

Les automates de Mealy se représentent sous la forme de diagramme d'états, de manière similaire aux automates de Moore. Prenons **My** (voir fig. 2.8), un automate de Mealy sur le même langage d'entrée L_Σ que **Mo**. Ici, l'automate génère en sortie le langage $L_{\mathcal{O}} : o_1(o_2o_1)^*$ qui représente fidèlement le flux d'entrée auquel le système est soumis. N.B cette équivalence est fortuite il n'y a pas nécessairement équivalence entre les langages, mais l'automate de Mealy possède cette possibilité de « rendre compte » de la séquence d'évènements à laquelle le système est soumis alors que cette possibilité n'est qu'indirectement accessible à l'automate de Moore.

My = $(X, \Sigma, t, X_0, F, \mathcal{O}, \tau)$ où

$X = \{1, 2\}$

$\Sigma = \{\sigma, \kappa\}$

$t = \{[(1, \sigma), 2], [(2, \kappa), 1]\}$

$X_0 = \{1\}$

$F = \{2\}$

$\mathcal{O} = \{o_1, o_2\}$

$\tau = \{[(1, \sigma), o_1], [(2, \kappa), o_2]\}$

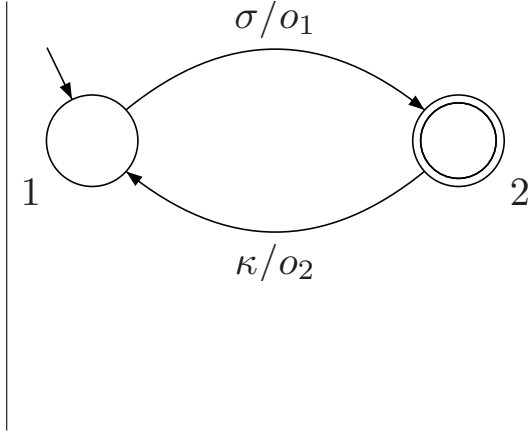
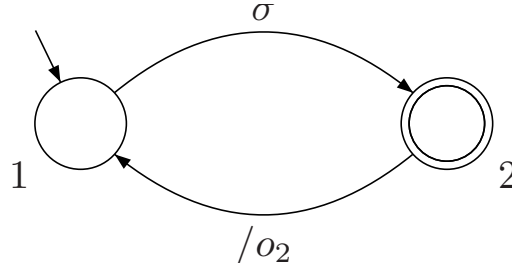


FIGURE 2.8 – Deux représentations de **My** (un automate de Mealy)

Graphiquement, l'expression des sorties se traduit figure 2.8 par l'apposition sur les labels de transition du symbole d'entrée et du symbole de sortie séparé du signe '/'. Cela produit des *labels* de transition de la forme ' σ/o ' où $\sigma \in \Sigma$ et $o \in \mathcal{O}$ avec le symbole vide $\epsilon \in \Sigma \cap \mathcal{O}$. On parle de *triggers* pour les symboles en entrée et *actions* pour les symboles générés en sortie.

Il est possible d'écrire des transitions sans sortie (c'est à dire $o = \epsilon$), dans ce cas on simplifie le label en précisant simplement le symbole en entrée. Il est également possible qu'une transition porte ϵ comme *trigger*, cela s'écrit sur le diagramme : ' $/o$ '. (voir fig. 2.9)

L'absence de *trigger* et d'*action* permet de faire l'économie d'un label pour la transition, mais nécessite une précision sémantique qui n'est pas intuitive. La question est de savoir quel sens précis donner à une transition ne portant pas de label ou n'ayant pas de *trigger*. En effet faut-il comprendre que, dès lors qu'aucun évènement n'a lieu, la transition doit se faire dans l'instant⁸, ou doit-on interpréter la transition comme signifiant que, le système pourra passer dans l'état suivant à n'importe quel moment ? Ce dernier type de sémantique de transition introduit de l'indéterminisme et ne permet plus de

FIGURE 2.9 – Automate de Mealy avec absence de *trigger* ou d'*action*.

simuler fidèlement un système. Elle peut néanmoins permettre modéliser le constat d'une transition dont on ignore la cause.

Après ces éléments théoriques utiles à l'analyse formelle des Statecharts, on présente ci-après les réseaux de Petri.

2.5 Réseau de Petri

Une grande place a été dévolue jusqu'ici à l'introduction des automates comme formalisme SED. Cette section introduit un formalisme alternatif aux automates pour la modélisation de Systèmes à Événements Discrets : les réseaux de Petri. Il existe par ailleurs d'autres formalismes alternatifs : tel par exemple Grafcet (David and Alla, 1992), Esterel (Berry and Gonthier, 1992) ou encore les algèbres de processus (Bergstra et al., 2001), qui ne seront pas présentés ici.

Les réseaux de Petri ont été créés par Carl Adam Petri en 1962. Il existe plusieurs variantes des Réseau de Petri (RdP) dont les sémantiques spécialisées sont plus ou moins riches.

Définition 15. d'après Diaz (2001), un Réseau de Petri places-transitions **R** se définit par le tuple : $(P, T, \text{Pré}, \text{Post})$ avec :

- $P = p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$ un ensemble de places;
- $T = t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ un ensemble de transitions, avec $P \cap T = \emptyset$
- $\text{Pré} : P \times T \mapsto \mathbb{N}$ une application d'incidence avant;
- $\text{Post} : P \times T \mapsto \mathbb{N}$ une application d'incidence arrière correspondant au arcs :
 - $\text{Pré}(p_i, t)$ contient la valeur entière n associée à l'arc allant de p_i à t ;
 - $\text{Post}(p_i, t)$ contient la valeur entière associée à l'arc allant de t à p_i .

Les Réseaux de Petri (RdP) se représentent par des graphes (fig. 2.10), il existe deux types de sommets : (i) les places représentées par des cercles et (ii) les transitions par des carrés (cette notation est tirée de van der Aalst and van Hee (2002), plus traditionnellement, les transitions sont représentées par une barre.)

g. Le temps est défini dans $\mathbb{R}$. Il y a toujours une infinité d'instants entre deux instants distincts.

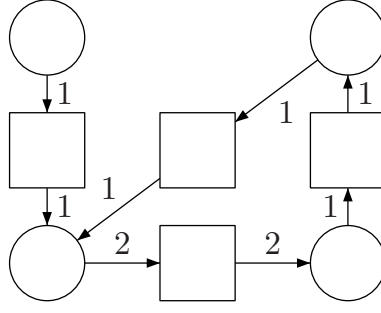


FIGURE 2.10 – Réseau de Petri (RdP) places transitions sans marquage

Le comportement du RdP est donné par l'évolution de jetons de places en places à travers les transitions selon les applications *Pré* et *Post*. La position des jetons dans le RdP est appelé le marquage du réseau.

Définition 16. Un Réseau de Petri places-transitions marqué se définit par un couple (R, m) dans lequel R est un Réseau de Petri places-transitions et $m : P \mapsto \mathbb{N}$ une application appelée marquage.

Les définitions ci-dessus impliquent que le comportement de R est connu à partir d'un unique m_0 le marquage initial. La figure 2.11 présente la séquence des différents marquages du RdP vue fig. 2.10 depuis son marquage initial m_0 .

Remarque : le marquage d'un RdP correspond à la notion d'état global pour un système considéré comme la composition de processus concurrents, voir : états concurrents des Statecharts.

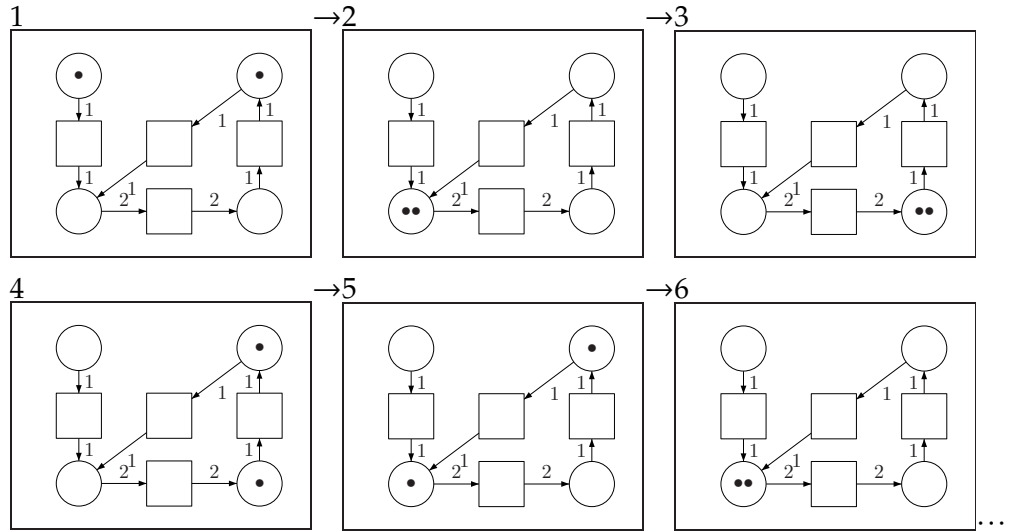
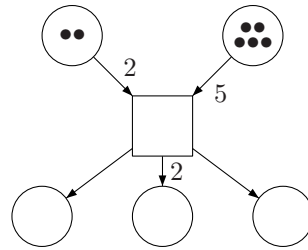


FIGURE 2.11 – L'évolution du marquage d'un RdP représente les changements états.

Lorsqu'il n'y a qu'un arc entre chaque transition et chaque place, la structure d'un RdP est analogue à celle d'un automate. En revanche, il est possible de créer des relations plus complexes entre places et transitions, avec plusieurs arcs entrants, une transition et

plusieurs arcs sortants d'une transition vers plusieurs places (par exemple fig. 2.12). La sémantique de ces transitions, permet de représenter les synchronisations d'automates concurrents ou les protocoles de communication entre processus communicants.



source : Diaz (2001)

FIGURE 2.12 – RdP synchronisant plusieurs processus : 2 et 5 jetons doivent être disponibles pour que la transition puisse être tirée ; à l'issue de la transition, les places de destination seront marquées de la manière suivante : 1,2,1.

Depuis la version initiale proposée en 1962, de nombreuses évolutions ont été proposées, notamment les Réseau de Petri temporisés (Merlin, 1974), pour lesquels une durée est associée au tir d'une transition ; les Réseau de Petri stochastiques, où les transitions possèdent une probabilité d'être tirée et les Réseau de Petri colorés pour lesquels les jetons sont dotés d'attributs (couleurs) dont les valeurs influent le tir des transitions. La figure 2.13 illustre l'organisation de ces évolutions.

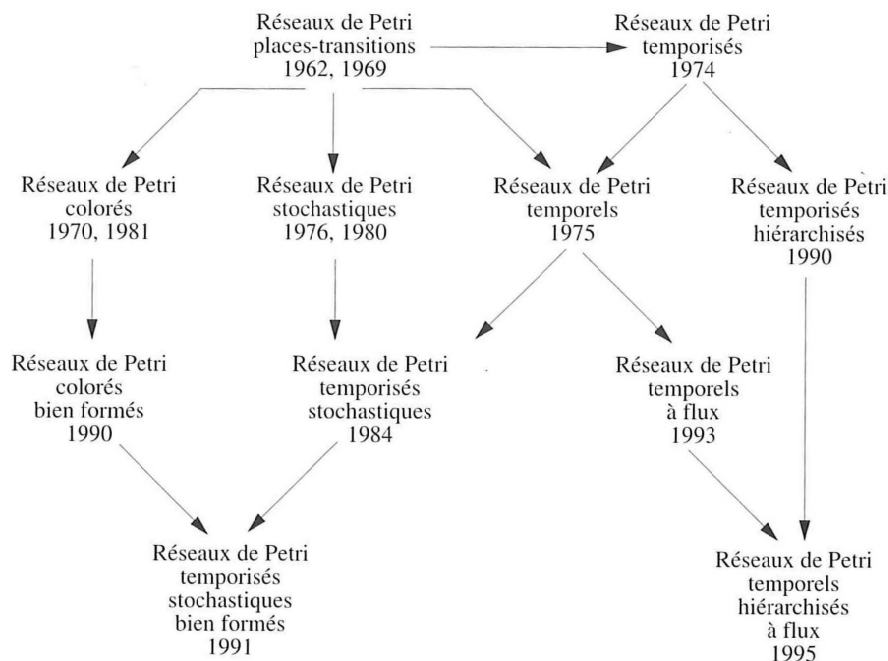


FIGURE 2.13 – Différentes familles de Réseaux de Petri

source : Diaz (2001)

En soi un RdP n'a pas de fonctionnalité. Pour modéliser un système par un RdP, il

faut donner un sens aux transitions et aux jetons. Ces derniers peuvent aussi bien représenter des ressources dans un système physique, que des messages dans un protocole de communication ou la réalisation de conditions logiques séquentielles (Hélias, 2003).

En effet, les RdP sont plus intuitifs que les automates pour représenter les communications de processus concurrents, et ils sont un formalisme bien adapté à la question de la gestion des ressources.

Cependant, au cours de mon travail, la question principale a été de modéliser la prise de décision séquentielle. On souhaitait que le modèle soit aisément compréhensible par des pathologistes, peu familier des formalismes informatiques. C'est pour cette raison que j'ai opté pour le langage des Statecharts, qui offre l'expressivité des automates à états finis pour les choix conditionnels, et une gestion suffisante des processus concurrents pour nous permettre de représenter un système de décision complexe sans avoir une explosion de la taille du graphe d'états.

Les RdP seront probablement à utiliser plus tard pour modéliser le passage à l'échelle de l'exploitation, lorsque le problème sera de gérer les flux d'informations et de ressources.

2.6 Statecharts

La section qui suit, présente le langage de modélisation graphique Statecharts qui a été utilisé dans cette thèse pour formaliser l'expertise et programmer un simulateur. On présentera en premier lieu les concepts propres aux Statecharts, puis on donnera la syntaxe du langage et enfin, on précisera les points importants de la sémantique formelle correspondant aux Statecharts objets tels qu'implémentés par Rhapsody® d'IBM^h.

2.6.1 Le concept de Statechart

Harel (1987) propose les Statecharts comme une solution au problème de l'explosion combinatoire qui handicape l'usage du formalisme Automate à États Finis (AEF) pour la modélisation de systèmes réactifs (Harel and Pnueli, 1985).

Définition 17. Selon Harel and Pnueli (1985), un système réactif se caractérise par le fait d'être piloté par l'évènement, ayant à réagir à des stimuli internes comme externes en continu.

Kam et al. (2003) précise :

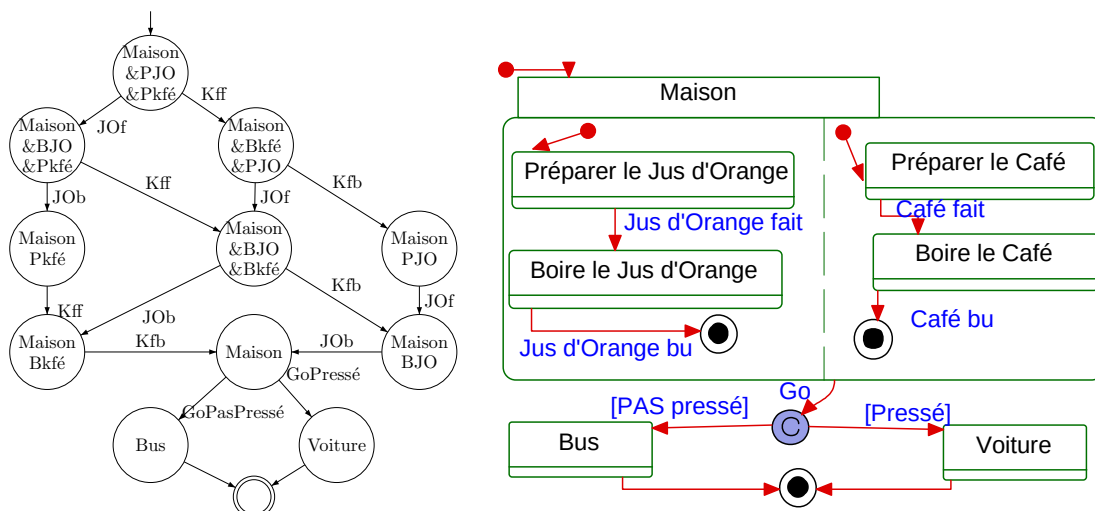
[. . .] Les systèmes réactifs sont ceux dont la complexité ne découle pas nécessairement de leur complexité algorithmique, mais de réactions complexes dans le temps. Ce sont le plus souvent des systèmes concurrents et fortement temporisés. Ils présentent des comportements hybrides principalement discrets, mais ayant aussi des aspects continus. La structure d'un système réactif est constitué de nombreux composants en interactions, dans lequel le contrôle du comportement est fortement distribué parmi les composants[. . .]

in : Kam et al. (2003)

h. Au cours de ma thèse, le logiciel a changé trois fois de marque.

Il s'agit donc de systèmes dont la principale caractéristique est d'être en interaction permanente avec le monde (par exemple un système de feux de signalisation, une calculatrice électronique).

L'usage des AEF et leur représentation sous forme de diagramme d'états-transitions (on fera l'amalgame AEF diagramme d'états-transitions), pose un problème de combinatoire, dès lors que le système à modéliser est constitué de plusieurs sous-systèmes éventuellement concurrents (voir produit d'automates page 57). La figure 2.14 présente un détail d'une journée de travail, la préparation et consommation du petit-déjeuner (boisson froide et boisson chaude, puis départ de la maison). L'AEF est le résultat du produit de trois automates distincts : préparer un jus d'orange, préparer un café et quitter le domicile selon deux modes de déplacement possibles (les états inaccessibles, –être dans le bus et préparer un café– ont été supprimés). Les états de la fig. 2.14(a) décrivent l'état d'avancement de tous les processus de manière fusionnée, alors que le Statechart fig. 2.14(b) met plus clairement en évidence chacun des trois processus et permet de souligner les relations entre eux. Il y a synchronisation à la fin du petit-déjeuner des processus café et jus d'orange avant de pouvoir partir.



(a) diagramme d'état transition

(b) Statechart

nom	label	type	nom	label	type
Préparer le café	Pkfé	état	café fait	Kff	évènement
Préparer le Jus d'Orange	PJO	état	café bu	Kfb	évènement
Boire le café	Bkfé	état	Jus d'orange fait	JO	évènement
Boire le Jus d'Orange	BJO	état	Jus d'orange bu	JO	évènement
Prendre la voiture	Voiture	état	partir pressé	GoPressé	évènement
Prendre le bus	Bus	état	partir à l'heure	GoPasPressé	évènement
Etre à la maison	Maison	état			

FIGURE 2.14 – détails de modèles d'une journée : la préparation du petit déjeuner.

La construction graphique des statecharts se fonde sur le concept de Higraph [Harel \(1988\)](#). Les Higraphs sont une organisation topologique de l'espace graphique permettant de représenter sous forme de graphe des notions ensemblistes telles que l'inclusion, la composition, l'intersection et le produit cartésien. Les Higraphs s'inspirent de deux formalismes graphiques : les diagrammes de Venn et les Hypergraphs ([Berge, 1973](#), in [Harel 1988](#)). La figure 2.15 illustre l'utilisation d'un higraph pour représenter un organigramme spatialisé.

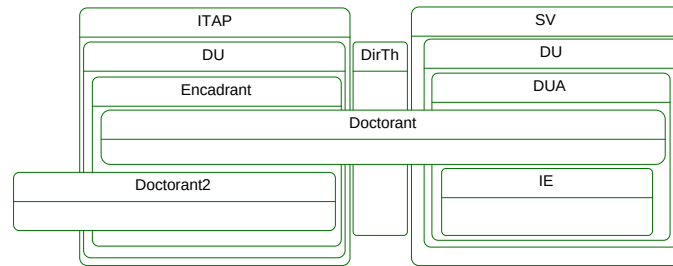


FIGURE 2.15 – Organigramme sous forme Higraph. Il présente la hiérarchie et les affectations

L'hypothèse à l'origine des statecharts est que, alors que le diagramme d'état n'utilise que la dimension géométrique de connexité du graphe pour représenter les états du système, par l'utilisation des dimensions topologiques, le Statechart rend possible une décomposition hiérarchique de la notion d'état. La modélisation de processus concurrents permet de réduire encore le nombre d'états visuellement décrits dans le modèle (à ne pas confondre avec le nombre d'états que peut prendre ce système, qui résulte des combinaisons de ces processus). [Cruz-Lemus et al. \(2005\)](#) a montré que ces traits rendent les Statecharts plus compréhensibles que les AEF (dès lors que l'utilisateur a un minimum d'expérience avec les Statecharts).

[Harel \(1987\)](#) résume les caractéristiques des Statecharts de la manière suivante :

diagramme d'état + hiérarchie + concurrence + communication diffusée (broadcast)

2.6.2 Syntaxe des Statecharts

Cette section présente la syntaxe des Statechart Unified Modelling Language (UML 2.0) tels que présentés dans [Harel and Kugler \(2004\)](#) et [Damm et al. \(2003\)](#).

NB. Les termes en petites majuscules font référence à des concepts présentés plus loin dans le texte.

2.6.2.1 Etats

Harel introduit quatre types d'états pour les Statechart (SC) (voir fig. 2.16). *Un état simple* est un état atomique, il correspond à la même notion que l'état de l'AEF (voir fig. 2.16(a)). *Un état final* correspond à un état marqué d'un automate, il indique la fin du processus d'un SC ou d'un sous-Statechart.

La hiérarchie des états est rendue possible à travers deux types d'états composés.

Les « *AND-State* » ou *états concurrents* définissent deux ou plus sous-Statechart s'exécutant en parallèle (cf. fig. 2.14b). Les processus concurrents d'un AND-State sont séparés les uns des autres par ces lignes pointilléesⁱ. Lorsqu'un état concurrent est actif, chacun des sous-Statechart le composant possède un état actif.

Le second type d'état composé est : Le « *OR-State* » ou *état séquentiel*. Ces états sont composés d'un ensemble d'états enfants mutuellement exclusifs et définissant un sous-Statechart. Lorsqu'un *état composé* est *actif*, un seul de ses enfants peut être actif. Chaque état Or-State, possèdent un *état par défaut* parmi ses enfants

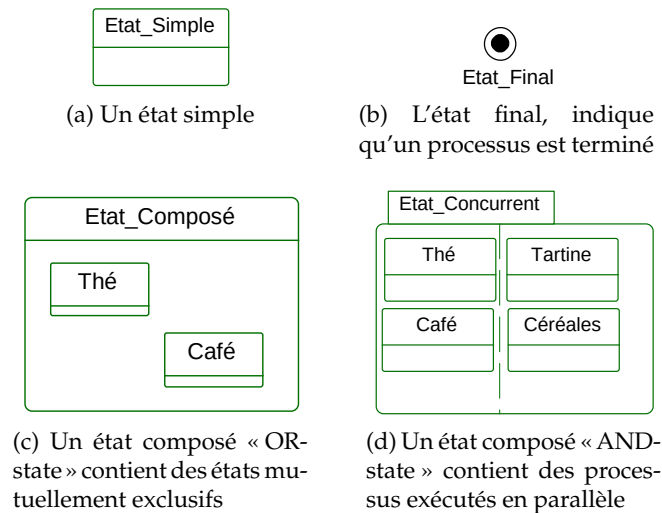


FIGURE 2.16 – Les quatre types d'états du Statechart

Remarque : Le formalisme Statechart est une approche « modulaire » de la AEF, mais les définitions canoniques des Statecharts (Harel, 1987; Harel et al., 1990; Harel and Kugler, 2004; Damm et al., 2003, par exemple) ne garantissent pas l'indépendance des composants (ce qui est pourtant une propriété recherchée en informatique). Les travaux sur les μ -charts (Scholz, 1998) adaptent les Statecharts pour garantir la composition des états hiérarchiques. L'auteur montre que la hiérarchie d'états d'un μ -chart peut être « mis à plat » mécaniquement pour former un ensemble d'automates concurrents.

2.6.2.2 Transitions

Les transitions relient un ensemble d'états sources à un ensemble d'états destinations.^j Le label de la transition est composé d'un « TRIGGER », d'une CONDITION et d'une ACTION. Le syntaxe d'un label de transition prend la forme suivante :

$$unTrigger[uneCondition]/uneAction$$

Une transition ne peut être franchie que si l'ensemble de ses états sources sont actifs, on dit alors qu'elle est « *potentialisée* ». Elle peut être *déclenchée* (triggered) par la réception

i. Dans l'implémentation de Rhapsody et la sémantique de Damm et al. (2003), à chacun des processus concurrents composant un AND-State, est associé un OR-State dans lequel le sous-Statechart est décrit.

j. La possibilité d'avoir plusieurs états sources ou plusieurs destinations permet de modéliser des comportements complexes de synchronisation entre des processus concurrents.

d'un TRIGGER, mais ne sera *franchie* que si la CONDITION est « vraie ». Comme pour les machines de Mealy, une ACTION s'exécute lors du franchissement de la transition. En théorie, les transitions sont instantanées ; dans la réalité, l'exécution de l'ACTION peut prendre plus que 0 temps.

Chacun des éléments constitutifs du label est optionnel. Une transition dépourvue de « trigger » est appelée une « transition nulle », elle est franchie dès que ces états sources sont actifs^k et que la CONDITION est vérifiée.

2.6.2.3 Triggers

Les triggers peuvent être de deux types.

Les *événements* sont des messages pouvant émaner du Statechart ou d'une source externe. Dans les Statechart objets tels que spécifiés par UML et implémentés dans Rhapsody, les événements ne sont pas instantanés. Ils sont d'abord stockés dans une pile « [» premier entré premier sorti] avant d'être traité dans l'ordre, lorsque le système se concentre sur l'objet (focus).

L'appel d'une « *triggered operation* » entraîne le franchissement de la transition (si la condition le permet). En Statechart UML, les « triggered opérations » sont une forme de communication synchrone entre deux objets. L'appel par un objet d'une de ses propres « triggered opérations » est interdit.

2.6.2.4 Conditions

La condition est une *formule booléenne* qui contrôle si une transition potentialisée peut effectivement être franchie. Elle est la composition de tests sur les attributs de l'objet, sur les valeurs d'une variable globale du système, ou d'une fonction booléenne.

2.6.2.5 Actions

Les actions sont des éléments algorithmiques qui modifient les valeurs internes d'un système. Il peut s'agir de la génération d'un événement, de l'affectation d'une variable, ou encore de l'appel d'une méthode de l'objet propriétaire du Statechart ou d'un objet associé.

Les Statechart sont des machines de Mealy, les sorties sont générées au cours des transitions. La figure 2.17 illustre les différentes possibilités syntaxiques permettant d'ajouter des actions à un Statechart.

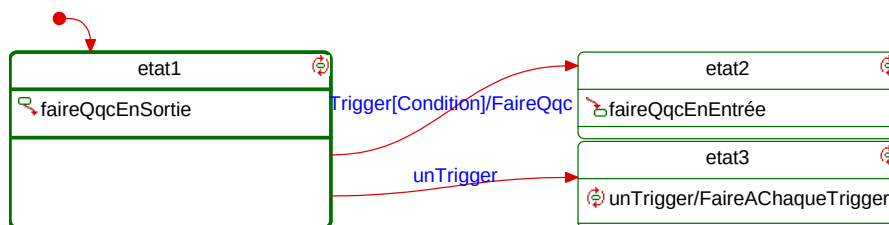


FIGURE 2.17 – Les actions peuvent être ordonnées à l'entrée, à la sortie ou pendant un état.

k. Cette sémantique correspond à Rhapsody et requiert en outre que l'objet propriétaire du Statechart détient le « focus »

En plus de pouvoir exécuter des actions pendant les transitions, le formalisme permet de spécifier un comportement générique en entrée et en sortie de chaque état. Ainsi dans l'exemple (fig. 2.17), l'état1 possède une action en sortie. Si la transition vers l'état est franchi, une séquence d'action sera générée : `faireQqcEnSortie + faireQqcch + faireQqcEnEntrée`; si l'autre transition est franchie, la séquence limitera à : `faireQqcEnSortie`. L'état3 ne possède pas d'action en entrée ni en sortie, mais est composé d'une transition interne (static reaction) qui exécutera l'action `FaireAchaqueTrigger`, à chaque occurrence de « unTrigger » tant que l'état est actif. Ce trait est la mise en œuvre formelle de la notion d'activité (le *do*) des Statechart UML 2.0. La spécification d'UML ne permet pas de garantir un état stable à chaque pas du système aussi n'a-t-elle pas été reprise dans Rhapsody.

2.6.2.6 Pseudostates

Les pseudostates sont des symboles graphiques qui n'ont pas de transcription dans la sémantique formelle, mais permettent d'améliorer la lisibilité de diagramme. La figure 2.18 présente les pseudostates, ce sont :

l'état initial également appelé transition par défaut, permet d'indiquer, lorsqu'un état séquentiel parent devient actif, lequel des états enfants doit être activé par défaut.

le noeud conditionnel permet d'exprimer les choix en fonction d'une variable ou d'un état concurrent. Le noeud conditionnel évite d'écrire deux transitions chaque fois qu'une condition entraîne une alternative.

la fourche et la jointure sont utilisées pour « regrouper » les différentes sources d'une transition ou de ses destinations.

la jonction regroupe des transitions hétérogènes vers la même destination, cela économise l'espace du diagramme.

le connecteur de diagramme évite que de trop nombreuses transitions ne se croisent. Il s'agit d'un raccourci.

l'historique est le seul pseudostate modifiant le comportement du Statechart. On distingue l'historique superficiel pour mémoriser le sous-état actif le plus récent et l'historique profond qui mémorise la configuration la plus récente de la hiérarchie complète de tous les enfants actifs de l'état portant l'historique, jusqu'aux états atomiques.

Au cours de cette section, les principaux éléments syntaxiques des Statecharts ont été présentés. Ils permettent une lecture rapide des diagrammes.

2.6.3 Syntaxe formelle du Statechart

Les définitions formelles qui suivent, résument la syntaxe formelle des Statecharts donnée dans Damm et al. (2003).

Définition 18. un Statechart SC est un 7-uplet, $SC = ((S \cup pS), T, E, G, A, ce_0)$, avec

S l'ensemble des états ;

pS l'ensemble des pseudostates ;

$T \subseteq S^{card(S)} \times E^* \times G \times A$ avec $E^* = E \cup NONE$, $NONE$ est le symbole indiquant une transition nulle ;

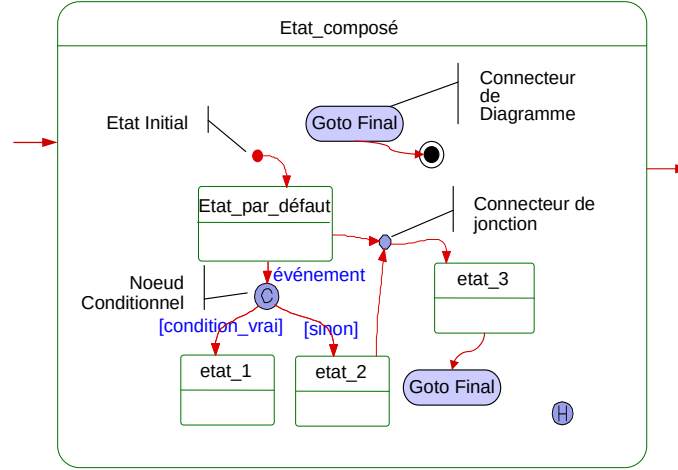


FIGURE 2.18 – Les Pseudostates (état initial, noeud conditionnel, jonction et le connecteur de diagramme) n'ont pas d'existence mathématique mais sont utiles graphiquement. L'historique permet de retrouver le dernier état actif lorsque le parent est réactivé

E l'ensemble des événements et « triggered operation » ;
 G l'ensemble des conditions contrôlant une transition ;
 A l'ensemble des actions que peut produire SC ;
 ce_0 la configuration par défaut du système.

La fonction $mod(s) \rightarrow SIMPLE, FINAL, OR, AND$ avec $s \in S$, détermine le type d'un état.

Les états d'un Statechart SC sont organisés comme une arborescence hiérarchique, avec au sommet un état nommé top , tel que $mod(top) = OR$.

On définit les relations entre états $child$ et $father$ tel que $S' = child(s) \Rightarrow mod(s) = OR, AND$ et $s = father(S')$. précisons que $S' \subset S$

Le niveau d'un état dans la hiérarchie se définit grâce à la fonction $depth : S \rightarrow \mathbb{N}^+$ telle que $depth(top) = 0$ et $depth(s) = depth(father(s) + 1)$. Il est alors possible de construire un ordre partiel sur SC.

Le statut d'un objet entre deux pas d'exécution, correspond à la configuration d'états active du Statechart décrivant son comportement.

Définition 19. L'état global d'un Statechart est la configuration courante des états actifs. Une configuration d'états ce est définie de la manière suivante :

$top \in ce$

si $s \in ce$ et $mod(s) = AND$ alors l'ensemble $child(s) \subset ce$

si $s \in ce$ et $mod(s) = OR$ alors il existe exactement un $s' \in ce$ avec $s' \in child(s)$

Définition 20. La configuration d'états par défaut ce_0 du SC est définie par la fonction états par défaut.

Précisons d'abord :

Soit $default(s)$ la fonction qui pour un état s définit l'état par défaut s' tel que $s' \in child(s)$ avec $mod(s) = OR$ sinon $default(s) = Nul$.

Soit un ensemble d'états $H \subseteq S$, H est dit consistant, ce qui est noté $\downarrow(H)$ ssi chaque couple s, s' de S est lié par la relation $child^*$ (c-à-d $depth(s) \leq depth(s')$ ou $depth(s) \geq depth(s')$) ou s et s' sont

orthogonaux (c-à-d appartiennent à différents processus enfants d'un AND-state). Un ensemble d'états consistant est un ensemble d'états susceptible d'être actifs en même temps.

Soit un ensemble consistant $H \subseteq S$, la fonction états par défaut noté $etatParDefaut(H)$ est le plus petit ensemble S' tel que :

$H \subseteq S'$,

si $s \in S'$ et $s \neq top$, alors $father(s) \in S'$,

si $s \in S'$, $mod(s) = OR$ et $child^{OR}(s) \cap S = \emptyset$, alors $defaut(s) \in S'$ où les éléments de $child^{OR}(s)$ sont de type OR,

si $s \in S'$ et $mod(s) = AND$, alors $child(s) \subseteq S'$

La configuration initiale ou configuration par défaut de SC est donnée par $etatParDefaut(top)$.

Ces précisions formelles permettent de mieux comprendre la nature du Statechart et les règles sémantiques qui déterminent son comportement.

2.6.4 Sémantique des Statecharts UML

Il existe plusieurs variantes des statecharts (von der Beeck, 1994, une revue un peu ancienne en énumère les principales) et de nombreuses sémantiques formelles. On pourra citer Harel et al. (1990) en ce qui concerne l'outil STATEMATE et Hamon and Rushby (2007) pour l'extension Stateflow du module Simulink Mathworks (2008). Ces deux outils se distinguent des Statechart orientés objet d'UML et de Rhapsody à propos de deux aspects sémantiques importants qui seront évoqués ci-après : l'hypothèse de synchronisme parfait des transitions et les règles de priorités. La sémantique qui est présentée correspond à la sémantique formelle présentée dans Damm et al. (2003); Harel and Kugler (2004). Ces deux documents sont consistants, mais il existe des différences subtiles entre les Statechart Rhapsody et la norme UML 2.0 ; Crane and Dingel (2007) étudie ces différences.

On précise ici la sémantique des transitions. Il s'agit dans un premier temps de préciser la priorité de sélection des transitions. La figure 2.19 illustre le problème du choix de la transition. Lorsque l'évènement e advient, l'état final n'est pas intuitivement connu, la règle pourrait être de donner la priorité à la transition émanant de l'état le plus abstrait (ici le transition $S1 \rightarrow S2$) ou plutôt de privilégier le comportement le plus spécifique (ici $(S11, S3) \rightarrow final$). Dans Rhapsody, c'est la seconde solution qui a été choisie.

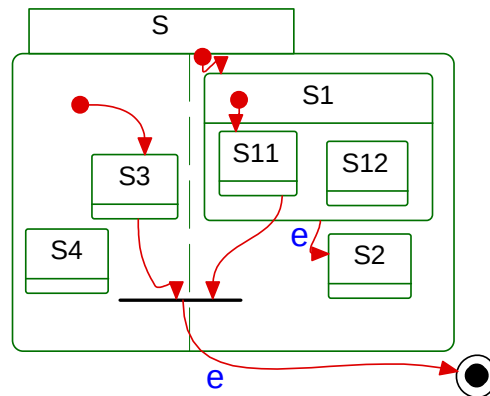


FIGURE 2.19 – quelle priorité pour les transitions ?

Ce choix est en rupture avec la sémantique proposée dans STATEMATE. Plus profond encore est l'abandon de l'hypothèse de synchronisme parfait des transitions ; dans Rhapsody, le modèle d'exécution correspond à ce qu'on nomme « run to completion »^l.

Ces deux paradigmes découlent de l'association des Statecharts dans un modèle objet. Dans Rhapsody le comportement du système est une succession de statuts observables à la fin de *pas* d'exécution. Le système se concentre sur un objet (focus), soit lorsque la pile d'appels transmet à l'objet un événement qui lui est destiné, soit lorsqu'un autre objet fait un appel direct à une triggered operation (TO). S'il existe au moins une transition dans l'ensemble des transitions potentialisées qui puissent être déclenchée par l'événement ou la TO et dont la condition est vraie, alors le pas est déclenché. Sinon, l'événement est consommé et le statut de l'objet reste inchangé.

Chaque action (en entrée, label, en sortie) déclenche ensuite des micro-pas. Les actions pouvant prendre du temps, l'hypothèse de synchronie des transitions ne peut donc être conservée dans Rhapsody. Les micro-pas sont exécutés séquentiellement parmi tous les OR-states tant que les conditions permettent le franchissement des transitions nulles^m. Lorsqu'aucune transition ne peut plus être franchie, le pas est complété, un nouveau statut stable est atteint.

Remarque : *La diffusion (broadcast) des événements n'est pas le mode de communication entre les objets. Par contre, au sein du Statechart d'un objet, les événements sont perçus par l'ensemble de processus concurrents.*

Ceci clôt la présentation des Statechart.

2.7 Conclusion du chapitre

On a montré que la protection des cultures est un problème de contrôle. Le pathosystème oïdium, mildiou, vigne est un système hybride pour lequel l'impossibilité de « guérir » les organes végétaux contaminés exclut l'usage d'une stratégie de contrôle en feedback. A cela s'ajoute l'absence de modèle biotechnique qui empêche l'application d'une boucle de contrôle feed forward.

Dans ces conditions, le recours à l'expertise est pertinent pour concevoir une méthode de contrôle du mildiou et de l'oïdium dont la consigne est de produire du raisin de qualité en étant économe en commande.

On a montré que c'était le contrôleur expert qu'il s'agissait ici de modéliser. La nature du problème de modélisation qu'il me fallait résoudre a été analysée et fournit les bases théoriques à la validation présentée au chapitre 6.

Les outils formels utilisés pour modéliser le **POD** Mildium, ont été présentés ainsi que les bases théoriques qui les sous-tendent.

l. exécuter jusqu'à son terme

m. potentiellement il peut y avoir un infini de micro-pas dans une boucle de transition nulle. Rhapsody gère ce problème en limitant le nombre de transition nulle successive

Ce chapitre théorique visait à analyser le problème de manière abstraite puis de présenter les outils sous l'angle technique. Le chapitre 3 apporte un regard plus méthodologique. Il présente diverses manières de modéliser les processus de décision en entreprise et notamment dans l'entreprise agricole.

Chapitre 3

Formalisation de la décision

Contents

3.1	L'analyse des systèmes agraires et de la décision	77
3.1.1	L'analyse des pratiques	77
3.1.2	L'analyse de la décision des agriculteurs	78
3.1.2.1	Principes du modèle d'action	78
3.1.2.2	Usage du modèle d'action	79
3.2	Décision et Simulation en agriculture	80
3.2.1	OTELLO un simulateur de modèle d'action ?	80
3.2.2	Couplage modèle décisionnel et modèle biotechnique	82
3.2.3	Simulation pour la conception de système de conduite	83
3.3	Un autre point de vue : la modélisation d'entreprise	85
3.3.1	La modélisation d'entreprise	85
3.3.2	Modélisation des processus métiers ou « workflow »	86
3.4	Principes du Processus Opérationnel de Décision « Mildium » pour la PIC du vignoble	89
3.4.1	Objectifs de Mildium	89
3.4.2	Un processus temporel	91
3.4.2.1	Analyse des périodes de sensibilité	91
3.4.2.2	Sept étapes de décision	91
3.4.3	Construction de variables décisionnelles	94
3.4.3.1	Variables de décision	94
3.4.3.2	Observations	95
3.4.3.3	Echantillonnage	95
3.4.3.4	Stades phénologiques	95
3.4.4	Conclusion à propos de la conception du POD Mildium	96
3.5	POD, workflow et modèle d'action	96
3.5.1	Le POD et les processus métiers	96
3.5.2	Le POD vis à vis de la simulation	97
3.5.3	Le POD vis à vis du modèle d'action	98
3.6	Conclusion	99

Au cours du chapitre précédent, j'ai présenté les formalismes mathématiques de modélisation utilisés au cours de mon travail. Dans ce chapitre, je positionnerai ce choix formel relevant de l'automatique et de l'informatique industrielle vis à vis de l'analyse de la décision en agronomie et des processus métiers en informatique de gestion (« workflow »). La prise de décision de l'agriculteur est un sujet largement étudié qui a donné naissance, en France, à la théorie du « *modèle d'action* ». La première section de ce chapitre s'attache à présenter cette théorie. La seconde section du chapitre explique comment cette théorie est utilisée dans de nombreux travaux de simulations et ce, sous divers formalismes. La troisième section présente les questions théoriques de l'analyse des processus métiers et de la modélisation d'entreprise (voir [BPM](#) et [BPE](#)^a). En effet ces représentations sont en grande partie similaires à celles traitées en agriculture : on présentera ici quelques formalismes développés pour la modélisation des processus métiers. La quatrième section présente la démarche de conception du [POD](#) Mildium et comment les experts ont mobilisé leurs connaissances et les principes de la [PIC](#) pour produire le Processus Opérationnel de Décision. On conclut ce chapitre par une discussion mettant en évidence le caractère générique de la démarche [POD](#) au regard des bases théoriques vues précédemment.

3.1 L'analyse des systèmes agraires et de la décision

La section qui suit développe un point de vue volontairement restreint de l'analyse de la décision de l'agriculteur. Les concepts du *modèle d'action* (voir section 3.1.2) font consensus dans la communauté agronomique française. Mon travail a donc été, dès le départ, naturellement immergé dans ce cadre conceptuel. Les approches alternatives de la part de la communauté agronomique internationale n'ont pas paru relever d'un apport disciplinaire aussi structuré. C'est donc dans le cadre de l'école française d'agronomie qu'il convient de comprendre les titres des sections ci-dessous.

3.1.1 L'analyse des pratiques

La notion d'itinéraire technique ([ITK](#)) reste centrale aujourd'hui chez les agronomes pour désigner à la fois les enchaînements d'opérations culturales mis en oeuvre sur un champ par l'agriculteur, mais aussi pour désigner les programmes issus de leurs travaux et conçus comme des préconisations.

D'après [Sebillotte \(1974, in Doré et al. 2006\)](#) :

L'itinéraire technique est une combinaison logique et ordonnée des techniques mises en oeuvre sur une parcelle en vue d'en obtenir une production.

in : [Sebillotte \(1974, in Doré et al. 2006\)](#)

Définition 21. Dans cette thèse, l'*ITK* désigne strictement une séquence d'opérations agricoles effectivement réalisées sur une unité de production, pour obtenir une production ou atteindre un objectif

[Papy \(1998\)](#) précise la démarche du département Sciences pour l'Action et le Développement ([SAD](#)) de l'INRA, entreprise à la fin des années 70. Elle est basée sur le constat que les

a. « Business Process Management » et « Business Process Engineering »

conseils indifférenciés à l'agriculteur ne répondaient plus, ou mal, au besoin. Il s'agit de développer une recherche visant à comprendre « les raisons de faire ce que fait l'agriculteur ». La distinction est alors faite entre les *techniques* et les *pratiques*. Les techniques sont définies par leur contenu plutôt théorique, quand les pratiques sont définies de la manière suivante :

Définition 22. *d'après Cristofini et al. (1978); Teissier (1979, in Papy 1998), Les pratiques sont les conditions concrètes de réalisation d'opérations techniques.*

Dans le cadre de l'analyse des pratiques, celles-ci sont postulées être le résultat d'une intention, elle-même fonction d'objectifs de l'agriculteur dans un contexte de contraintes et d'opportunités.

in : Papy (1998)

L'observation de l'ITK de l'agriculteur (une séquence d'opérations techniques) ne suffit pourtant pas pour comprendre son action et ses pratiques. La notion d'ITK ne permet pas de rendre compte des alternatives ni d'expliquer la diversité des pratiques de l'agriculteur. Cette explication requiert la compréhension de son mode de raisonnement.

3.1.2 L'analyse de la décision des agriculteurs

Le cadre d'analyse mis en place pour comprendre le raisonnement de l'agriculteur s'inspire des travaux économiques de Simon (1957, 1978, in Sebillote and Soler 1988). L'intérêt ne porte pas tant sur les processus cognitifs mis en œuvre par l'agriculteur, que sur l'objectivation des *processus de décision* d'un agriculteur réputé rationnel. Afin de réaliser ses objectifs de production, l'agriculteur serait doté d'un *modèle général* guidant ses choix au cours de la saison culturale et lui permettant d'organiser l'ITK qu'il applique à la parcelle (Sebillote and Soler, 1988).

3.1.2.1 Principes du modèle d'action

Ce modèle général est aussi appelé *modèle d'action*. Il permet à l'agriculteur d'organiser par anticipation son action au cours de la saison (ou du cycle de production). L'agriculteur ne réagit pas en permanence au dernier événement survenu. Face aux incertitudes auxquelles il est soumis par l'environnement de l'agro-système, il construit un plan prévisionnel en fonction de scénarios probables de déroulement de la saison. Ainsi pour réaliser ses objectifs de production (objectifs quantitatifs, qualitatifs), il découpe la saison en plusieurs phases au cours desquelles il concentrera son attention sur la réalisation de sous-objectifs.

Le découpage en phases permet à l'agriculteur de mieux maîtriser les incertitudes de l'environnement. Pour cela, il se dote de jeux de règles de décision lui permettant de gérer son activité tant que l'environnement évolue dans ce que l'on pourrait assimiler à une enveloppe de variations normales. En cas de déviation trop grande, il est amené à réviser ses sous-objectifs voire ses objectifs et par conséquent de recourir à un jeu de règles alternatif.

Cerf and Sebillote (1988) précise le mode opératoire de cette révision en montrant l'importance des indicateurs de décision. L'agriculteur prend ses décisions sur la base

d'indicateurs permettant d'estimer l'état du champ. Les états observés sont confrontés à l'état souhaité à cette période, permettant de poursuivre avec le programme prévisionnel courant, ou d'en adopter un autre. Ceci s'effectue dans les limites de l'expérience personnelle de l'agriculteur et non dans l'ensemble des solutions possibles.

L'introduction des observations montre que l'agriculteur révisé ses prévisions au cours de *rendez-vous* (Chatelin et al., 1993, in Ingrand et al. 2003) qu'il fait porter sur les « points chauds » de la saison (Sebillote and Soler, 1988). Les rendez-vous permettent à l'agriculteur d'agir sur ses représentations, c'est à dire sur les modèles prévisionnels d'évolution de l'agro-système issus de son expérience. Ils permettent de mettre à jour ses prévisions et de déterminer les nouveaux états-objectifs atteignables sous condition d'ajuster l'ensemble des règles de décision. La saison se déroule par une restriction de plus en plus étroite des états potentiellement atteignables tant en ce qui concerne les sous-objectifs de la phase suivante qu'en ce qui concerne l'objectif final. La mise à jour du jeu de règles adaptées permet de produire le programme prévisionnel (l'ITK) à mettre en œuvre dans la phase.

Les rendez-vous permettent également d'articuler les phases entre elles. Il existe en outre un ensemble de règles de supervision générale pour gérer les choix des jeux de règles. En effet, il peut être nécessaire de changer de jeux de règles entre les deux phases, mais aussi en cas d'urgence lorsqu'un événement imprévu exige l'abandon du programme d'action normal pour mode de gestion exceptionnelle (Duru et al., 1988). Cette articulation donne lieu à la formalisation de *pilotage opérationnel* et de *pilotage stratégique*^b. Le pilotage opérationnel renvoie aux décisions de gestion courante et au programme d'action. Le pilotage stratégique permet d'orienter les choix de programme d'action dans le but d'achever le projet de production. (Chatelin et al., 1993, in Papy 1998).

On a déjà évoqué plus haut la notion d'expérience qui permet à l'agriculteur d'envisager les futurs potentiels. Papy (1998) associe au modèle d'action un modèle de connaissances qui est proche de notre notion d'expertise (voir fig. 2.4) et permet à l'agriculteur en fonction de son expérience, de bien anticiper et de bien concevoir ses indicateurs et/ou son modèle d'action .

3.1.2.2 Usage du modèle d'action

Le modèle d'action est principalement un outil de diagnostic. Le modèle d'action de l'agriculteur se construit sur la base d'entretiens semi-dirigés auprès de l'agriculteur que l'on complète éventuellement par l'observation des pratiques. Le concept a été initialement élaboré dans le cadre d'études portant sur les grandes cultures picardes, à l'échelle du champ et de la saison.

Il a été montré que la théorie était également opérante à l'échelle de l'exploitation et dans d'autres domaines agricoles (élevages). Le développement de modèle d'action vise notamment à diagnostiquer la qualité des ITK et l'adéquation des ressources à la charge

b. Stratégique n'a pas ici la même valeur que celle donnée par les pathologistes au chapitre 1. La définition des échelles temporelles absolues des niveaux stratégiques, tactiques, opérationnelles n'a pas vraiment de valeur générale et chaque discipline semble établir un consensus terminologique entre ce qui relève du stratégique, du tactique et de l'opérationnel. Ici, la relation d'ordre suffira, le niveau stratégique désignant un niveau de plus générale que le niveau tactique, lui-même plus général que le niveau opérationnel

de travail pendant les périodes critiques (Duru et al., 1988; Papy, 1998). L'objectif de ce travail de diagnostic est à terme la production d'Outils d'Aide à la Décision (OAD). On notera à cet égard les approches de Girard et al. (2001) qui, constatant l'impossibilité de réaliser un modèle d'action complet individualisé pour chaque exploitation particulière, réalisent un nombre limité de prototypes sur la base de l'étude approfondie d'un panel d'exploitations et de la littérature. Une exploitation particulière peut ainsi être caractérisée par sa distance à chaque prototype et un conseil individualisé est alors déduit de cette distance (Dounias et al., 2002, dans le même esprit).

Le modèle d'action fournit un cadre d'analyse de la décision en lien avec l'appareil de production dans ses composantes techniques. Ceci explique son adoption par les praticiens du diagnostic comme par les agronomes des systèmes pour l'étude des relations entre le système de culture et les stratégies de l'agriculture. La question du formalisme donné, dans la littérature, au modèle d'action est l'objet de la section suivante.

3.2 Décision et Simulation en agriculture

La théorie du modèle d'action a été énoncée à la fin des années 1980. A la même période, la micro informatique s'est largement diffusée avec l'apparition des micro-ordinateurs compatibles IBM PC (Attonaty et al., 1994). La concomitance de cette nouvelle représentation structurée de la prise de décision avec la mise à disposition d'une puissance de calcul jusque là économiquement inabordable a permis le développement de la simulation informatique pour l'agronome (Attonaty et al., 1988).

Comparés aux problèmes rencontrés dans les ateliers d'entreprises industrielles, les problèmes de décision en agriculture sont difficiles. L'environnement de l'entreprise agricole est, en effet, largement incertain. C'est pour cette raison, que la recherche de stratégies optimales pour la gestion des agro-systèmes s'est tournée massivement vers la simulation pour étudier le comportement de stratégies de décisions opérationnelles et en tester de nouvelles.

3.2.1 OTELO un simulateur de modèle d'action ?

Grand ancien dans le domaine, le système Organisation du Travail Et Langage à Objet (OTELO) (Attonaty et al., 1994) simule l'organisation des travaux dans le temps en fonction des contraintes d'exploitation, et des règles de gestion dont se dote l'exploitant. Elles sont une représentation formalisée du modèle d'action de l'agriculteur. Ces règles de gestion sont structurées de la manière suivante :

- L'agriculteur exécute des travaux dont la réalisation est tributaire des conditions de milieu. Ces travaux ou chantiers consomment des ressources en travail et satisfont des besoins liés à la conduite des cultures.
- Pour conduire à bien ses cultures, il définit les règles d'enchaînements de travaux à effectuer et les modalités adaptées à différentes situations.
- Enfin, ayant à conduire plusieurs cultures à la fois et compte-tenu de moyens de travail limités, il est amené à gérer des conflits entre chantiers. Il règle ces conflits en fixant des priorités en accord avec ses objectifs

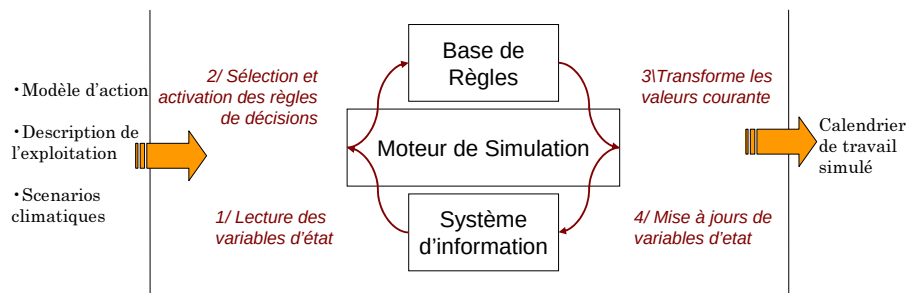


FIGURE 3.1 – Structure et flux du simulateur OTELO

d'avancement global des travaux. Ces objectifs, implicites, évoluant dans le temps, nous avons été amenés à découper la campagne en périodes.

in : Poussin (1992)

Les règles de gestion prennent concrètement la forme d'une base de règles de décision qui s'écrit de la manière suivante :

SI (*< conditions >*) *< décisions >*
 SINON *< décisions alternatives >*

Les conditions sont une composition d'*indicateurs* booléens, construites à partir des variables d'état du *système d'information*. Un langage de programmation dédié a été créé pour paramétrer OTELO.

La figure 3.1 résume le fonctionnement d'OTELLO. Les simulations se font sur la base de scénarios climatiques, d'une structure d'exploitation (description du parcellaire, ressources mécaniques/humaines), d'un calendrier (w/e, jours fériés. . .) et de l'état d'avancement des travaux. Ces quatre éléments constituent le *système d'information* d'OTELLO. Ce système d'information est mis à jour à chaque pas de la simulation (représentant une journée) par le moteur de simulation.

Le module décisionnel est la dernière composante du système OTELO. Les règles de décision sont sélectionnées puis activées jour à jour en fonction de l'état du système d'information. Avec le sous-ensemble des règles activées, le *moteur de simulation* reproduit les décisions que prendrait l'agriculteur s'il se trouvait dans la même situation. Cela consiste à sélectionner les chantiers et à éditer leur état : commencer, suspendre ou terminer. Cela consiste enfin à fixer les priorités entre les chantiers et à assigner les ressources. . . Au terme de ces opérations, le moteur met à jour les variables du système d'information.

Bien que l'on sente l'influence des systèmes experts dans la conception d'OTELLO, il n'y a pas de moteur d'inférence logique de connaissance lié au module de décision. En cela, le système OTELO ne rend pas totalement compte des fonctionnalités du modèle d'action dans la mesure où il n'y a pas de possibilité de réviser la base de règles en fonction d'un état non prévu du système (absence de modèle de connaissances). Néanmoins la capacité d'arbitrer parmi les chantiers en fonction de leurs importances, de leurs avancements, de la suite du plan, leur fixant une priorité révisable, rend bien compte de la notion d'arbitrage qu'on retrouve dans la littérature.

3.2.2 Couplage modèle décisionnel et modèle biotechnique

Le système Décibl  (Chatelin et al., 2005) est caractéristique de la génération suivant OTELO. Développé par la même équipe que le système OTELO, le système D cibl  est conçu comme l'interaction d'un modèle de décision avec un modèle de simulation biotechnique. L'objectif de ce second modèle est de prendre en compte l'effet des opérations sur l'environnement de la culture et l'effet de l'environnement sur le développement de la plante et la construction du rendement. Il s'agit ici d'une conception modulaire structurée autour d'un modèle de développement phénologique du blé, connecté aux modules suivants :

- module rendement potentiel atteignable permettant d'évaluer la performance de la conduite.
- module azote, permettant d'estimer les pertes d es aux carences azotées
- module hydrique, calculant la réserve utile qui influence fortement la structure du sol.
- module structure du sol, reliant l'effet des travaux aux autres modules sol et permettant de traduire les sorties de ces modules vers le module développement.

D cibl  produit trois types de sorties : rendements, diagnostics à chaque étape et évaluation de l'impact environnemental de la stratégie de fumure azot e.

L'utilisation de modèle biotechnique se retrouve dans de nombreux outils d'aide à la décision ou visant la mise au point de nouvelles références techniques (Nesme et al., 2006; Debaeke et al., 2006, par exemple). On citera comme exemple en pathologie, le système EPIPRE de Zadoks (1989), qui en matière d'outils d'aide à la décision, fait figure de précurseur. EPIPRE, tout comme D cibl , est conçu sur la base de modèles stochastiques. Ces types de modèles biotechniques ont l'avantage d'être rapides à mettre en place mais n'ont pas la généricité qu'offre une modélisation déterministe. En revanche, les modèles déterministes ont l'inconvénient d'être basés sur des variables d'état difficiles à mesurer et l'interprétation de leurs résultats reste souvent difficile. Cette complexité rend l'usage de tels modèles peu adapté pour le conseil aux exploitants.

McCown (2002) analyse le problème de la sous utilisation de ce type d'OAD chez les agriculteurs. Il aboutit à deux types de conclusion. D'une part, les OAD trop complexes ne sont pas mis en œuvre par les agriculteurs. Cela est confirmé en d'autres termes par Parker (2001) expliquant que trop souvent les OAD agricoles p chent par manque de souci ergonomique lors de la phase de conception. Le second point évoqué par McCown est relatif à l'étroitesse de l'expertise. Après une phase d'utilisation, nombre d'outils d'aide à la décision sont finalement abandonnés, l'agriculteur ayant appris les connaissances contenues dans le système informatique et pouvant les mobiliser sans avoir recours à la machine.

La conclusion de cette réflexion serait selon McCown, qu'il n'est pas nécessaire de modéliser la complexité du processus de décision des agriculteurs si l'objectif est de faire du diagnostic, particulièrement si le domaine d'expertise est étroit. Selon une opinion répandue dont Parker serait ici la porte parole, mieux vaudrait produire un logiciel permettant un accès adapté aux informations des modèles biotechniques et laisser au chef d'entreprise agricole la responsabilité de sa gestion (« management »).

Pour autant, il se construit toujours des systèmes de simulation décisionnelle. Un exemple récent^c est le modèle *bio-économique* de la vigne réalisé dans le cadre du projet ADD-Vin (Bazoche et al., 2008; Deola et al., 2007). Ce modèle associe un modèle expert de développement des épidémies de mildiou et d'oïdium à un modèle de décision phytosanitaire (qui peut éventuellement être un POD). Ce modèle biotechnique est alimenté par des chroniques climatiques et de croissance de la plante. Le modèle est dit bio-économique car les sorties du modèle biotechnique (rendement et nombre d'opérations phytosanitaires) sont mises en relation avec leurs coûts analytiques, pour *in fine* estimer le profit moyen d'une stratégie phytosanitaire. L'objectif de cette modélisation est ici purement scientifique. Le modèle de développement, de conception strictement experte, n'a pour objectif que de produire des épidémies qui doivent reproduire la réalité en tendance. Les valeurs quantitatives ne sont pas significatives ni en termes de dommages ni de pertes. Par contre l'hypothèse est faite qu'entre deux stratégies phytosanitaires, le modèle permettra de construire un ordre partiel du risque financier impliqué par telle ou telle stratégie.

Il s'agit dans ce cas d'une modélisation portant sur un domaine étroit (la protection phytosanitaire de la vigne) dont l'objectif à terme est l'aide à la décision des décideurs publics, pour déterminer le mode d'intervention publique favorisant le mieux l'évolution des pratiques. En forçant le trait, ce simulateur respecte bien le constat fait plus haut qu'un décideur est capable de concevoir des stratégies de décision qui lui conviennent dans la mesure où lui sont fournis de bons modèles biotechniques. Ici, c'est l'entreprise viticole qui est le système biotechnique et le nombre de traitements phytosanitaires, la variable à piloter. Cela ne correspond pas à un simulateur indiquant quand et comment il faut traiter.

3.2.3 Simulation pour la conception de système de conduite

L'autre argument pour justifier la poursuite de travaux de simulation décisionnelle dans le cadre de l'OAD vient du constat que, dans bien des cas, le recours à la simulation portait sur un problème étroit dont la solution optimale n'est souvent pas décidable (en environnement aléatoire), mais dont les solutions heuristiques sont accessibles à l'agriculteur. Les développements ont donc été axés sur la modélisation de systèmes de production complexes (Martin-Clouaire and Relier, 2003), dans le but d'expérimenter par la simulation de stratégies de gestion innovantes.

L'approche menée par l'Unité de Recherche (UR) Biométrie et Intelligence Artificielle (BIA) de Toulouse s'inspire de la modélisation d'entreprise (voir section 3.3.1). Cela mène à une modélisation structurée en trois sous-systèmes (voir fig. 3.2).

La décision est ici représentée comme le fruit de l'interaction entre des *plans* prévisionnels et des *actions* à réaliser sous condition de *ressources*. L'exploitation est organisée autour d'un système de pilotage : le *pilote* (l'exploitant, le chef de culture) responsable des décisions stratégiques et de l'organisation des activités complexes. Ces activités complexes sont ensuite déléguées pour leur mise en œuvre au *système opérant* responsable de la gestion opérationnelle. Le pilote est responsable de la réalisation des objectifs de production au travers d'une *stratégie*, gérant la cohérence de l'ensemble des plans et qu'il

c. nov. 2008

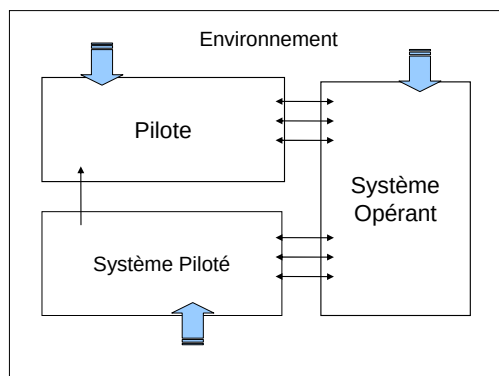


FIGURE 3.2 – Conduite d'un système de production agricole

exécute de manière séquentielle. Le pilote observe l'état du *système piloté* (une serre, une ferme d'élevage) à travers des capteurs. Les informations issues des capteurs peuvent éventuellement être agrégées dans des *indicateurs* (se référant non seulement à l'état courant du système mais aussi éventuellement à des événements, à des états passés ou à des prévisions). Une déviation du système par rapport à l'état attendu peut donner lieu à modification de la stratégie sur une « *trajectoire réactive* »

Les ordres d'exécution des activités à réaliser pendant la période courante, sont transmis au système opérant qui se charge de la gestion des ressources humaines et matérielles, de la liste des opérations à faire pour réaliser une *activité primitive* (l'unité d'action). Ce sous-système est responsable de l'organisation des opérations en fonction de la disponibilité des ressources nécessaires à leur réalisation. Il gère donc l'organisation opérationnelle des activités qui produisent l'*TTK* effectivement appliqué au système piloté. Le système opérant est soumis à des événements concernant les ressources. Ces événements peuvent être soit endogènes, soit exogènes.

Le système contrôlé (la serre, l'élevage) est modélisé à partir d'un modèle biophysique interfacé avec les deux autres sous-systèmes précédents.

Les communications se font par événements et lecture de variables. La programmation est orientée objet et s'il s'agit bien du paradigme *SED* qui est mis en œuvre dans cette dernière approche, il n'est pas question pour autant d'adopter les formalismes de représentation des automates. Il faut noter les travaux de modélisation *SED* assez similaires de : Shaffer and Brodahl (1998); Shaffer et al. (2000); Ingrand et al. (2003), qui représentent ainsi des stratégies de gestion d'élevage bovin.

L'approche de l'unité *BIA* a donné lieu à la réalisation d'une ontologie générique décrivant le fonctionnement des systèmes de production et plus particulièrement les systèmes de production agricole (Martin-Clouaire and Rellier, 2002). Elle a été mise en œuvre dans plusieurs domaines d'application notamment, la production de tomates sous serre (CONCERTO Rellier et al., 1997) ou encore dans le cadre de la mise au point de stratégies innovantes pour la gestion de pâturage (SEPATOU Cros et al., 2001).

La simulation décisionnelle a montré ses limites dans le cadre de l'aide à la décision et du diagnostic, mais elle reste un outil d'aide à la conception rapide de systèmes de conduite innovants pour les agronomes. Cet objectif est somme toute proche du

nôtre. La différence majeure entre les travaux de l'unité BIA et ceux que l'on présente ici réside dans le recours à un modèle biotechnique. L'autre différence tient dans les domaines d'application : la gestion de serre et l'élevage bovin sont des environnements soumis à des comportements moins chaotiques que la protection des vignobles. Cette dernière remarque doit être comprise plus comme une explication de l'absence de modèle biotechnique, qu'une limitation de la démarche de conception par simulation *in silico*.

3.3 Un autre point de vue : la modélisation d'entreprise

On aborde dans cette section quelques approches de modélisation d'entreprise, plus particulièrement les formalismes de représentation des processus métier qui ont motivé notre choix d'une représentation graphique pour le POD.

3.3.1 La modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise s'est développée sous l'impulsion de l'intégration informatique. Cette intégration de l'informatique au cœur de l'entreprise a commencé par le développement des systèmes d'informations dans les années 1970 jusqu'à prendre en compte l'ensemble des composantes de l'entreprise via les Enterprise Resource Planning (ERP) depuis le tournant du millénaire (Gaaloul, 2007).

L'approche analytique de la modélisation d'entreprise vise à couvrir divers besoins.

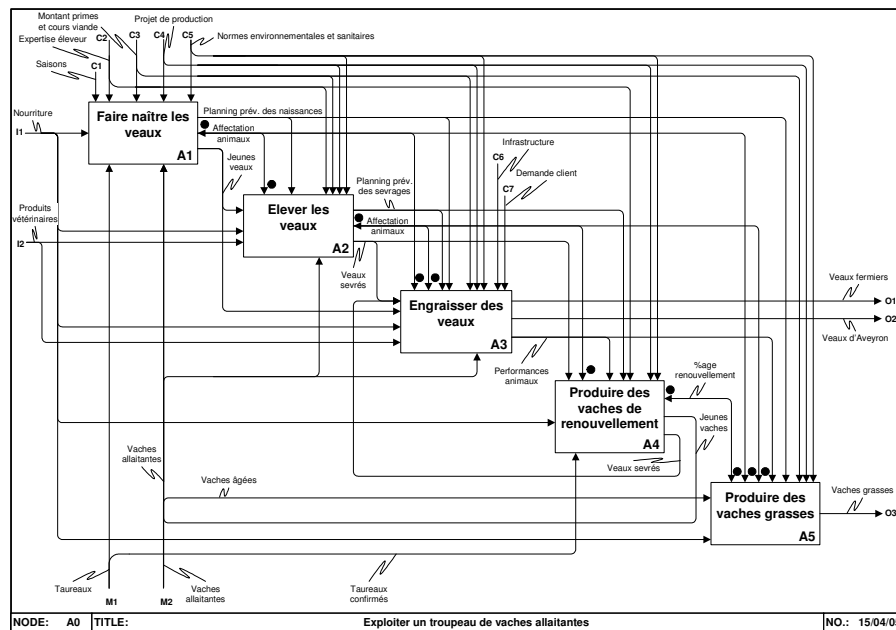
- comprendre et expliquer une situation existante
- réaliser et valider un projet
- communiquer entre les acteurs de l'entreprise
- argumenter une décision
- piloter le système entreprise.

d'après : Chapurlat (2007)

Pour répondre à ces besoins, des méthodologies complètes telles que CIMOSA (Vernadat, 1999, in Abt et al. 2005) ou encore GRAI-GIM (Doumeingts et al., 1998; Zanettin and Doumeingts, 1992, in Chapurlat 2007) ont été mises au point. Ces méthodologies sont souvent associées à des outils de modélisation ad-hoc (CIMOSA-RG par exemple). Ces méthodologies mettent en œuvre divers outils pour représenter les facettes de l'entreprise.

On prendra les travaux de Abt et al. (2005) comme exemple. L'auteur cherche à évaluer la pertinence de ce type d'outil de modélisation d'entreprise dans le cadre de l'entreprise agricole. Il utilise la méthodologie CIMOSA pour modéliser un élevage bovin. La structure de l'entreprise est décrite à l'aide de la méthode AMS qui lui a permis de mettre en lumière les « ateliers » de la ferme et d'identifier les flux physiques et les indicateurs de pilotage.

A l'aide de la grille GRAI, il a pu identifier les activités de l'exploitation et dissocier les activités de décision des activités d'opération. Pour chaque activité, la grille GRAI permet de définir les horizons de validité des décisions (c'est à dire la période pendant laquelle les effets de la décision portent) et la période de l'activité (c'est à dire le rythme auquel l'activité ou la décision doivent être renouvelées).



source : Abt et al. (2005)

FIGURE 3.3 – Modèle IDEF0/SADT Diagramme A0 d'une exploitation d'élevage bovin

A l'aide de la méthode *IDEF0/SADT* (IDEF, 1993, in Lavazza and del Bianco 2001), il a précisé à un niveau stratégique les flux physiques ou d'information entrant dans la réalisation d'une activité, ainsi que les flux échangés entre activités. La figure 3.3 illustre le graphe informel réalisé dans l'exploitation étudiée avec cette méthode.

Ces modèles donnent plusieurs vues de la même entité. Abt (2007) montre comment ces méthodes de modélisation partagent un certain nombre de concepts relatifs à la prise de décision en agriculture. Les méthodes de modélisation présentées ci-dessus sont à positionner à un niveau stratégique. Les modèles qui en sont issus constituent le plus souvent des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires et administrateurs, mais ils n'offrent pas une représentation opérationnelle de l'entreprise. L'initiative « Unified Enterprise Modelling Language » (Unified Enterprise Modelling Language (UEML)) (Berio et al., 2005) vise à offrir une ontologie unifiant ces concepts et permettant d'établir les bases d'une utilisation opérationnelle de ceux-ci. Pour autant les descriptions en termes de structure et de flux ne sont en tout état de cause pas exécutables en l'absence de description des processus métiers qui constituent le « comportement » de l'entreprise (BEH_{Ets} , selon la terminologie définie en section 2.2.3).

3.3.2 Modélisation des processus métiers ou « workflow »

L'étude et la modélisation des processus métiers se sont développées comme une discipline de l'informatique de gestion depuis la fin des années 1980. On ne tentera pas ici de faire une revue de la littérature sur ce sujet mais seulement de donner quelques éléments généraux, principalement issus des travaux menés à l'Université de Eindhoven par van der Aalst. Ses travaux sur l'inférence de processus métiers à partir des traces

d'exécution, ont été notre porte d'entrée dans ce domaine (van der Aalst and Weijters, 2004; van der Aalst et al., 1994).

On reprend la définition donnée par Davenport and James (1990, in Gaaloul 2007)

Définition 23. un « processus métiers » (*workflow*) est un ensemble d'activités logiquement liées pour réaliser un produit particulier destiné à un client ou à un marché.

Van der Aalst and van Hee (2002) indiquent que l'activité productive, qu'elle soit effectuée par un acteur mécanique ou humain, peut être dissociée en deux parties. D'un côté le *processus métier*, dont on peut décrire la succession d'activités et de l'autre, le cas particulier (la production du millésime 2008, la rédaction de ma thèse). La gestion d'un cas est discrète par nature, indiquent les auteurs. C'est à dire qu'il y a un début et une fin pour chaque cas. Quand la production d'un bien ou un service a un caractère répétitif et/ou générique, on peut par abstraction la décrire par des *processus métiers* (l'agronome parlera de modèle d'action ou de plan).

Chaque cas peut donc être *identifié* individuellement et la *route* prise par un cas particulier dans le processus sera la séquence particulière d'activités qui dépendent des *attributs* caractéristiques du cas. Cette notion de route est à rapprocher de l'itinéraire technique (l'ITK d'une parcelle sera différent d'une parcelle à l'autre). Un cas a une durée de vie limitée, si on rapproche le concept de la production agricole, le traitement d'un cas ne serait donc pas l'ITK de la parcelle, mais plutôt l'ITK du raisin issu de cette parcelle et par composition, l'ensemble des ITK des différentes parcelles formerait par composition l'ITK de la bouteille.

Remarque : Des systèmes de traçabilité de la parcelle à la bouteille sont déjà installés dans certaines coopératives françaises, ce qui place l'industrie viticole face aux mêmes enjeux organisationnels que les clusters les plus hi-tech de la Silicon Valley. Pour autant, faute de traçabilité des ITK, il est encore aujourd'hui impossible d'identifier le workflow d'une bouteille. L'agrégation de ces données permettrait, par exemple, de proposer des formations spécifiques aux producteurs lorsque la mise en œuvre de certaines opérations aura pu être identifiée comme dégradant la qualité de leur production. Les systèmes de traçabilité mis en place aujourd'hui ne permettent que d'identifier l'origine parcellaire des défauts dans les vins, sans permettre de diagnostiquer l'origine du problème.

Un cas en cours de traitement, en plus de son *identifiant*, est caractérisé par son *état*. Celui-ci est composé des valeurs de ses *attributs* descriptifs, de *conditions* qui ont été réalisées et du *contenu* du cas. Les attributs correspondent aux variables d'états qui nous permettent de décrire la phénologie, le niveau d'attaque... Les conditions sont, selon le mot même de van der Aalst and van Hee, « des sortes de phases dans lesquelles se trouve le cas », c'est à dire, que les conditions décrivent les différentes activités qui ont déjà été effectuées au cours de son traitement dans le processus. Le *contenu* est l'aspect le plus spécifiquement disciplinaire de la description, puisque cela fait référence à des documents, des archives qui ne sont pas spécifiquement liées au procédé lui-même, mais peuvent être utilisées par un opérateur humain pour fonder une décision^d

d. La notion de contenu du cas est celle qui paraît la plus éloignée du contexte agricole. En agriculture, ce type d'information pourrait-il être rapproché des notions de traits de vies ? Il est certain que le contenu des « cas agricoles » réside dans l'expérience de l'agriculteur pour une part importante.

Le processus est décrit par l'agencement de *tâches* (l'élément atomique de l'organisation du travail) qui sont combinées selon quatre mécanismes de construction :

- la séquence
- la sélection (il s'agit là d'une alternative (OR-split) suivie d'un jonction (OR-join))
- le traitement en parallèle (impliquant au moins une disjonction (AND-split) et une synchronisation (AND-split) puisque le processus possède exactement un début et une fin)
- l'itération

L'exécution du processus pour un cas particulier, donne lieu à la création à partir des tâches abstraites du processus, à la création d'un « *work item* » pour chaque tâche devant être exécutée pour traiter le cas. Ces « *work items* » sont finalement transformés en *activité* lorsqu'une *ressource compétente* est associée au cas pour effectuer le « *work item* ». L'état du cas en est modifié.

Pour représenter les processus métiers, des formalismes nombreux existent (voir la présentation donnée dans Lavazza and del Bianco, 2001). La figure 3.4 reprend l'exemple du chapitre 2 avec deux formalismes utilisés pour représenter les processus métiers : les réseaux de Petri (RdP) et les diagrammes d'activité d'UML 2.0 « Unified Modelling Language ».

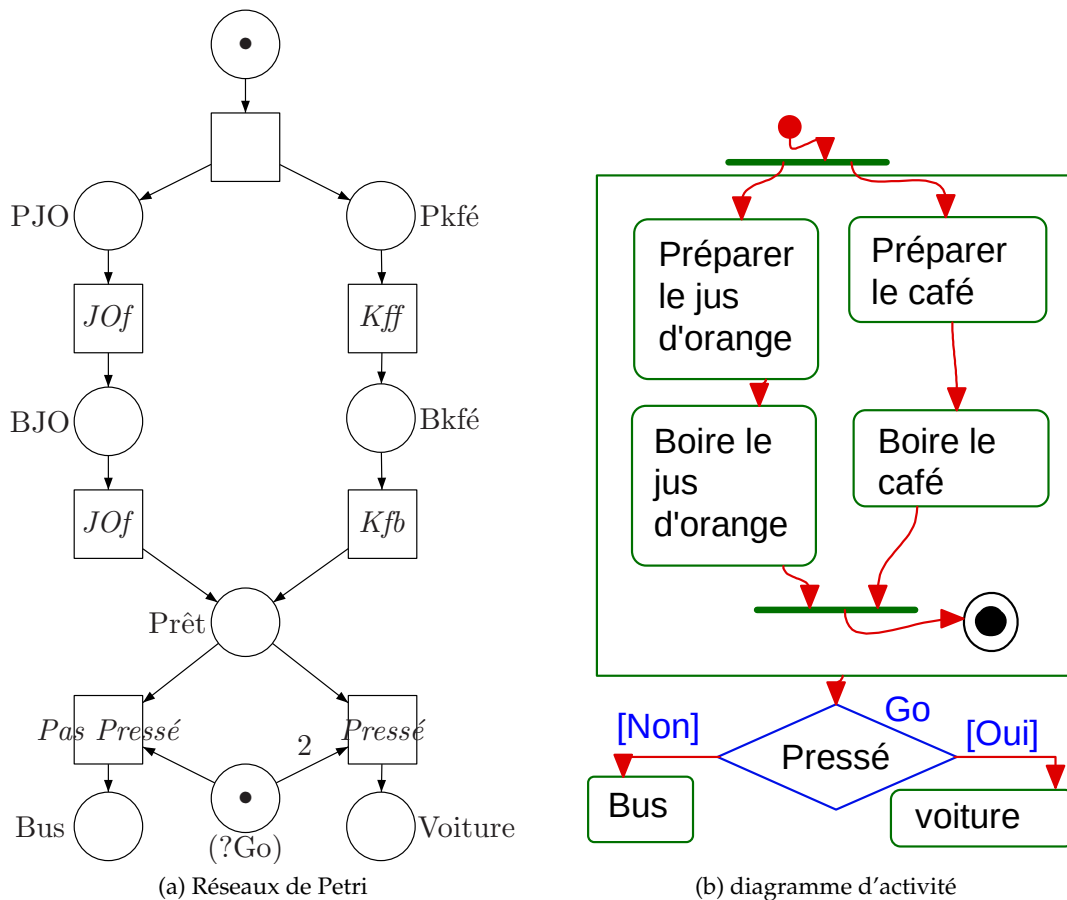


FIGURE 3.4 – Deux exemples de formalismes utilisés pour modéliser les processus métiers (La nomenclature des places et des événements, correspond à celle de la figure 2.14b)

Les représentations basées sur les **RdP** sont à préférer dans le cadre d'un travail formel dans la mesure où leur sémantique est bien connue et que de nombreux outils sont disponibles. Les diagrammes d'activité sont par contre moins bien formalisés, même si **Eshuis and Wieringa (2002)** proposent une sémantique formelle pour ce langage et que leur appartenance au cadre **UML 2.0** attire une attention considérable sur ce langage. Ils sont cependant relativement intuitifs et leur usage informel est très aisé particulièrement pour les utilisateurs familiers des diagrammes de flux dont ils s'inspirent. Les diagrammes d'activité sont principalement dérivés des Statechart. Aussi ai-je préféré travailler avec le plus formel des deux langages. On discute les **RdP** vis à vis de la modélisation **POD** dans la dernière section de ce chapitre après avoir illustré et précisé cette notion de **POD** avec les bases originales de Mildium.

Pour conclure cette section, retenons de la modélisation des processus métiers et la modélisation d'entreprise, l'approche de l'entreprise industrielle ou de service vue comme un système qu'il est possible de modéliser et que les outils analytiques de l'informatique sont susceptibles d'améliorer.

3.4 Principes du Processus Opérationnel de Décision « Mildium » pour la PIC du vignoble

Comme introduit au chapitre 1, le **POD** Mildium a été construit sur la base de quatre années d'expérimentations (2001-2004) et des règles de décision oïdium et mildiou. Dans la section qui suit, on illustre la démarche des experts pathologistes dans la conception du **POD** Mildium.

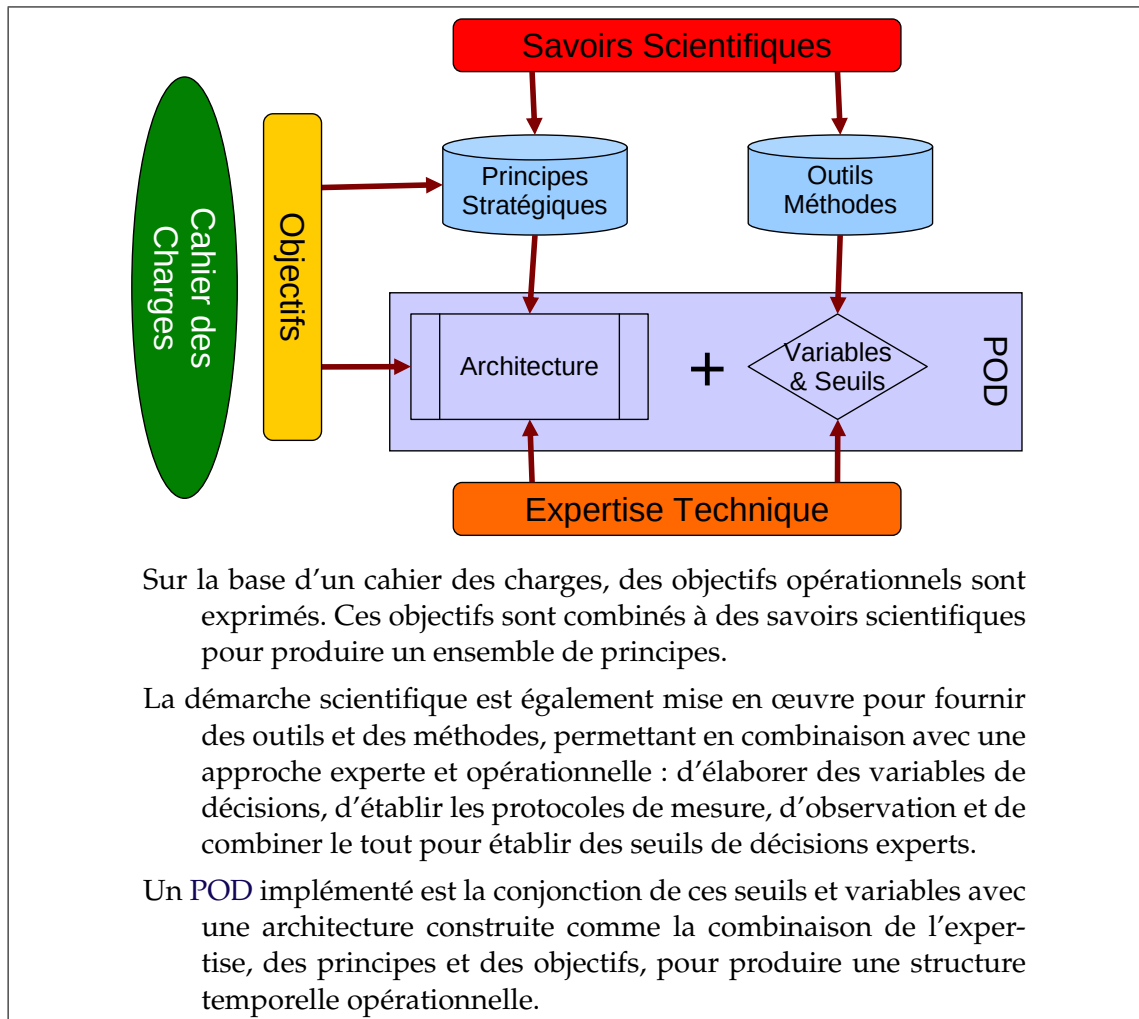
L'oïdium et le mildiou sont traditionnellement traités de manière combinée par la plupart des viticulteurs (cf. fig. A.2 en annexe p.234). Il est donc apparu intéressant d'un point de vue opérationnel de fusionner la gestion de ces deux maladies dans un procédé innovant. Le **POD** Mildium (ou « Mildium » tout simplement), est une proposition visant à gérer simultanément deux maladies.

La démarche de conception peut se découper en trois parties : tout d'abord, choisir des objectifs de protection, puis élaborer des indicateurs de décision et finalement organiser le processus de décision. L'encadré 4 synthétise la démarche.

3.4.1 Objectifs de Mildium

La conception est structurée pour répondre à quatre objectifs principaux :

1. Associer les traitements Mildiou et Oïdium autant que possible
2. Limiter le nombre d'applications fongicides (et de passages) annuel total de l'exploitation.
3. Garantir une qualité de protection compatible avec la production de vin (AOC, cahier des charges)
4. Remplacer une stratégie de traitements systématiques, par une stratégie basant les décisions de traitement sur plus d'intelligence et un meilleur usage de l'information, pour un coût minimum.



Encadré 4 – Démarche de conception d'un **POD.**

Ces quatre objectifs ne sont pas orthogonaux et le rôle des concepteurs consiste à les rendre compatibles. Par exemple, concilier l'exigence de réalisation des quotas de production avec l'objectif de réduire le nombre de traitements phytosanitaires ou encore, rendre compatible l'association mildiou-oïdium tout en évitant les traitements systématiques à cadence régulière.

Les objectifs sont pour cela adossés à des principes de conception qui aident à faire les compromis nécessaires :

1. Le raisonnement doit être adapté au développement parasitaire observé *dans la parcelle* (cela permet au niveau de l'exploitation de n'appliquer que les traitements réellement utiles).
2. Il n'est pas question de minimiser à tout prix les nombres de traitements mais de s'organiser de manière à *n'appliquer que les traitements nécessaires*, en découplant éventuellement les traitements mildiou et oïdium.
3. Les traitements nécessaires sont ceux qui permettent d'éviter les dommages aux cultures, *les symptômes doivent être tolérés*.
4. La viticulture a pour objectif de produire du raisin. Aussi l'objectif de la protection est-il de *limiter le taux d'attaque sur grappe à la vendange*. Le feuillage n'est à protéger

que dans la mesure où l'épidémie sur feuille conditionne l'épidémie sur grappes et dans la mesure où le feuillage assure la croissance des baies et l'accumulation des sucres.

3.4.2 Un processus temporel

L'élaboration de Mildium a commencé en 2005, sur la base de deux règles de décision expérimentées de 2001 à 2004 : une « RDD mildiou » et une « RDD oïdium ». L'exposé qu'on en donne ici est donc une reconstruction *a posteriori*. La figure 3.5 résume l'analyse des pathologistes.

3.4.2.1 Analyse des périodes de sensibilité

La figure 3.5(a) permet d'identifier les périodes de sensibilité des différents organes. Mildium visant à protéger les grappes, la période de sensibilité de celles-ci est critique puisque les risques de dommage vis-à-vis de la production sont maximaux. Cette période est encadrée par deux périodes de nuisibilité moins virulentes, où le feuillage est sensible, mais où la production court moins de risques.

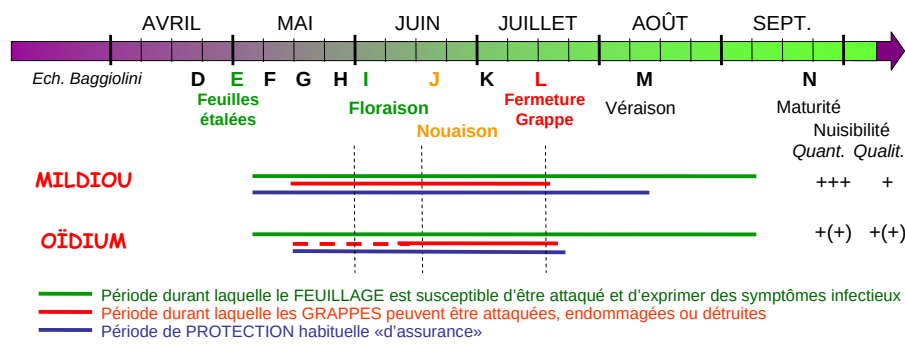
En *début de saison*, la stratégie mise en œuvre dans Mildium consiste à contrôler le plus efficacement possible le début des épidémies de manière à réduire le niveau d'infestation pendant la période critique de l'élaboration du rendement (c'est-à-dire des stades phénologiques boutons floraux séparés à mi-fermeture de la grappe ($\approx$ BBCH 57 à 75)). La figure 3.5(b) en illustre la raison : une épidémie précoce touchera quasiment l'ensemble des ceps à la floraison avec une forte probabilité de détruire l'ensemble de la production alors qu'une épidémie tardive entrera dans sa phase explosive après la nouaison, c'est-à-dire à un moment où les baies amorcent déjà une perte de sensibilité à la maladie. C'est pourquoi, Mildium vise à piloter la protection de telle façon que les épidémies se développent le plus tard possible dans la parcelle.

Pendant *la floraison*, le besoin de protection est maximal. Aussi, dans un souci de simplicité opérationnelle et de réduction de coûts, il est apparu raisonnable de prévoir un traitement obligatoire à la floraison contre chaque maladie. Le coût potentiel d'une économie de traitement à ce stade, a été jugé inacceptable (coûts d'information pour sécuriser la décision ou coût des pertes potentielles en cas d'erreur)

Durant la période de *fermeture de la grappe*, il faut pouvoir moduler la protection des fruits et du feuillage dans des contextes épidémiques où les risques de dommages peuvent être encore importants, ceci pour le mildiou comme pour l'oïdium. Au-delà de cette période, nous savons que la sensibilité des grappes diminue rapidement (cf. section 1.3.1), la protection peut être quasi suspendue.

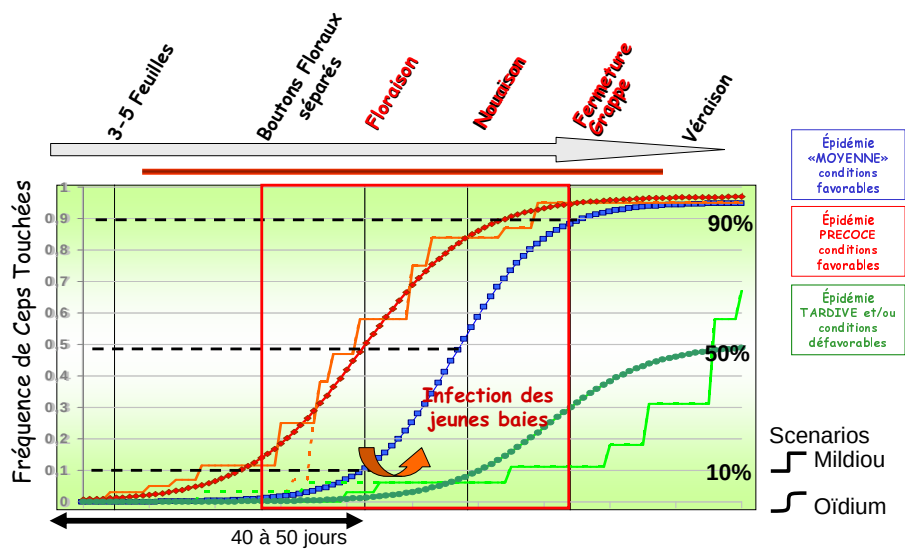
3.4.2.2 Sept étapes de décision

Partant de ces trois périodes, les concepteurs ont imaginé de découper encore plus finement la saison en sept étapes de décision et d'action, centrées sur l'intervention obligatoire à la floraison (voir fig. 3.5(c) et tab. 3.1). En cela, l'historique de « l'action PIC » joue, puisque c'est la structure de la « RDD oïdium », qui découle de l'expertise épidémiologique sur cette maladie, qui a piloté cette organisation temporelle en étapes. L'oïdium est une maladie dont les conditions de développement sont aisément réunies



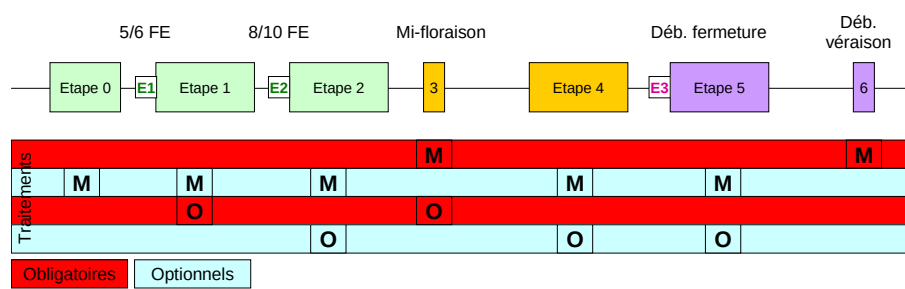
source : d'après L. Delière, Santé végétale, INRA, Bordeaux

(a) Périodes de sensibilité de la vigne au mildiou et à l'oïdium



source : d'après P. Cartolaro, Santé végétale, INRA, Bordeaux

(b) Intensité des attaques en fonction de scénarios épidémiques (idéalisés) à trois périodes : Une période d'initialisations des épidémies, suivie de la période critique de la floraison-nouaison, et finalement les périodes moins sensibles de la fermeture de la grappe et de la véraison



source : d'après L.Delière & P. Cartolaro, Santé végétale, INRA, Bordeaux

(c) Mildium découpe la saison culturale en 7 étapes pouvant donner lieu chacune à des traitements (anti-mildiou **M**, anti-oïdium **O**) obligatoires ou optionnels, E correspond à évaluation au champ

FIGURE 3.5 – De l'analyse des période risques épidémiques à l'élaboration d'un Processus Opérationnel de Décision (POD) pour protéger la vigne contre le mildiou et l'oïdium.

Période	Étapes	Objectif	Moyens
Initiale	0 à 2	Maîtrise des épidémies précoces	Évaluation de l'initiation des épidémies et de leur développement avant la floraison
Critique	3	Sécurisation de l'efficacité sur grappes	Traitement mildiou & oïdium au stade mi-floraison
	4	Protection du feuillage et des grappes (fin de période de réceptivité des baies)	Traitement mildiou & oïdium optionnel en fonction de l'initiation épidémique
Tardive	5	État des lieux de l'état sanitaire - opportunité de la poursuite de la protection	Traitement mildiou & oïdium optionnel en fonction d'une observation à la parcelle
	6	Protection du feuillage d'arrière saison (environ 45-60 jours avant récolte)	Traitement obligatoire du feuillage avec un fongicide à base de cuivre

TABLE 3.1 – Articulation entre les périodes de risques, les étapes, les objectifs de protection à chaque étape et les moyens mis en œuvre

mais difficiles à mesurer. Une fois la dynamique épidémique enclenchée, il faut la contrôler de manière continue tant que la vigne est sensible, c'est à dire que la protection contre l'oïdium doit permettre une couverture complète de la période. A l'inverse, le mildiou est une maladie « évènementielle », ses conditions favorables (les pluies) sont aisément observables et partiellement prévisibles. En outre, un premier modèle : Epi89 est utilisé pour estimer le risque d'infection primaire en début de saison, puis le modèle Milvit calcule le développement de *p. viticola* au cours de la saison (Rouzet and Jacquin, 2003).

La rémanence des produits^e utilisés dans Mildium est la plus longue possible de manière à minimiser le nombre de traitements même dans les années où la forte pression épidémique implique une couverture complète. Cette durée est de quatorze jours pour les produits systémiques employés contre l'oïdium. Comme l'indique schématiquement la figure 3.5(b), les contaminations primaires en bordelais ont lieu entre trente et quarante jours avant la floraison. Deux étapes de décision sont donc positionnées environ quinze jours avant la floraison et un mois avant la floraison. Le premier traitement contre l'oïdium est capital puisque comme le montrent les recherches de Santé Végétale (fig. 1.6), les dommages les plus graves sur grappes se retrouvent sur les ceps où les attaques étaient les plus précoces. Un traitement obligatoire est donc à faire contre l'oïdium durant « l'étape 1 ».

Le raisonnement des traitements mildiou pris individuellement se fait selon deux types d'informations : l'estimation des risques de contamination et l'anticipation des

e. La période de rémanence est la durée technique pendant laquelle le produit phytosanitaire va continuer à être actif sans qu'il ne soit nécessaire de renouveler le traitement. Cette durée est établie par le dossier d'homologation du produit. C'est une durée qui intègre la perte d'efficacité du produit et la croissance de la plante.

On a rencontré deux interprétations de cet indicateur : à savoir (i) la durée de rémanence est interprétée comme la période pendant laquelle le produit est toujours actif même partiellement ce qui, compte tenu de la croissance de la plante, implique de possibles contaminations (hors produit systémique), ou bien (ii) la durée de rémanence est la période pendant laquelle les risques de contamination sont garantis nuls ou faibles, l'efficacité ne diminuant qu'à l'expiration de la durée de rémanence. Les Experts Bordelais travaillent selon la seconde interprétation.

pluies^f. En période sèche le mildiou ne peut pas se développer (sauf en cas de forte rosée matinale, par hypothèse et faute de pouvoir la prédire, la rosée n'est pas prise en compte dans la conception de Mildium). Il suffirait donc de répéter pendant toute la période de sensibilité la règle de décision suivante :

$$\text{Epidémie déclarée} \wedge (\text{Risques} \neq \text{nul}) \wedge \text{Pluie prévue} \Rightarrow \text{Traiter mildiou}$$

Cette formule résume bien la stratégie mildiou qui consiste à attendre que l'épidémie soit présente dans la parcelle avant de commencer les traitements puis à renouveler l'application sous condition. Dans Mildium cette « Règle Mildiou » est fusionnée au découpage en étapes nécessaire à l'oïdium.

Combiner « mildiou oïdium » rend la mise en œuvre plus aisée, mais rend le travail du concepteur plus difficile puisque cela l'oblige à organiser le raisonnement de deux luttes qui ne répondent pas aux mêmes logiques. Il y a donc à chaque étape, des choix de priorité qui conduisent à une organisation spécifique du raisonnement. Avec l'ajout du mildiou dans la gestion des étapes, on introduit les notions d'attente et de durée, or la représentation de la décision sous forme de tableau croisé tel qu'initialement utilisé pour formaliser Mildium, ne permet ni de raisonner, ni de rendre compte fidèlement de l'ensemble du processus décisionnel (voir en annexe la version originale de Mildium : tab. B.1).

Chaque étape décisionnelle se caractérise : par (i) un ensemble de conditions d'entrée et un ensemble de conditions de sortie et par (ii) zéro ou une décision de traitement contre l'oïdium et une décision contre le mildiou. Ces traitements sont obligatoires ou décidés en fonction du contexte épidémique (voir figure 3.5(c)). La prise de décision de traitement ou de passage d'une étape à l'autre, nécessite de l'information.

3.4.3 Construction de variables décisionnelles

Pour répondre aux questions « quand » (passer à l'étape suivante) et « quoi faire », les experts pathologistes se sont dotés de trois variables décisionnelles (voir la présentation détaillée de Mildium chap. 5) et ont fait le choix d'effectuer des observations directes au champ.

Au court de « l'action PIC » il a donc fallu :

- déterminer les indicateurs parcellaires pertinents ;
- définir le protocole d'observation ;
- établir le moment opportun pour faire la mesure ;
- et donner à chaque étape des seuils de décision.

3.4.3.1 Variables de décision

Les experts concepteurs ont fait le choix, original, de déconnecter : le raisonnement des traitements, la prise de mesure et la détermination des seuils de décision. Pour cela ils ont considéré trois variables de décision qualitative (M pour le mildiou, O pour l'oïdium et ILM pour l'information locale mildiou, voir chap. 5 et chap. 6), leur affectant

f. Idéalement, seule la combinaison des deux devrait donner lieu à l'application d'un traitement anti-mildiou. Pour autant, compte tenu des risques de contamination, il est parfois dangereux d'attendre qu'une pluie soit prévue pour protéger la vigne : en effet un « faux positif » de la part des prévisions météorologiques peut avoir des conséquences désastreuses.

une valeur symbolique prise dans {‘0’, ‘+’, ‘++’}. Ces valeurs s’interprètent de la manière suivante :

‘0’	niveau nul à modéré
‘+’	niveau préoccupant
‘++’	niveau très préoccupant, urgence

Remarque : dans certains cas il n’y a pas de distinction entre le niveau préoccupant et le niveau très préoccupant, la variable varie alors entre ‘0’ et ‘+’.

Cette approche permet de varier en fonction des contextes particuliers, la définition des seuils ou la méthode de recueil de l’information, de chacune de ces variables. Ainsi, dans les expérimentations menées à Bordeaux, les seuils sont adaptés à chaque période d’observation (voir tab. 6.1 p.165).

3.4.3.2 Observations

La première observation est positionnée avant l’étape 1, la seconde avant l’étape 2 et la troisième avant l’étape 5. Une observation supplémentaire est possible en étape 0 sous conditions. Les objectifs de chaque observation sont présentés au chapitre 5. Les observations s’intercalent dans le temps avec les étapes de décisions. Leurs conditions d’exécution sont du même type que les conditions d’entrée ou de sortie des étapes. Elles dépendent notamment de l’évaluation des stades phénologiques.

3.4.3.3 Echantillonnage

La qualité de l’échantillonnage est un point important pour toute stratégie IPM (Hughes, 1999). Cependant de nombreuses stratégies d’échantillonnage mises au point par les universitaires ne sont pas transférables telles quelles aux professionnels (Cullen et al., 2000). La méthodologie d’échantillonnage aux champs de Mildium (voir section 6.4.2.1) a été construite avec le souci d’être opérationnel ^g.

3.4.3.4 Stades phénologiques

Le stade phénologique est un indicateur pertinent pour la gestion de l’épidémie car la sensibilité de l’hôte varie au cours de son développement mais construire un indicateur opérationnel fiable est difficile. La question de la fiabilité de l’estimation du stade phénologique conditionne la répétabilité des expériences (voir chap. 6). Cette question se pose au niveau parcellaire, avec la difficulté à établir un indicateur représentatif et à l’interpréter (stade moyen, stade précoce). . . La question reste ouverte. Les expérimentations ont été menées en estimant le stade phénologique « au jugé » lors des « tours de plaine » comme cela se fait dans la pratique. Au cours de la thèse, j’ai cherché à modéliser cet estimateur expert à partir des données expérimentales du processus Mildium et de suivis précis de la phénologie des parcelles. A l’issue de cette recherche, aucun modèle satisfaisant n’a été trouvé pour simuler les estimations de phénologie des experts. On a cependant mis en lumière le fait que les difficultés ne sont pas seulement liées à l’agrégation de l’information parcellaire : l’échelle multi-parcellaire joue aussi dans l’estimation des experts.

g. la détection précoce de l’oïdium est une tâche nécessitant une formation car les symptômes sont discrets, mais les opérateurs formés peuvent échantillonner une parcelle d’un hectare en 1h30

3.4.4 Conclusion à propos de la conception du POD Mildium

Ces premiers travaux ont produit les concepts de gestion combinée de l'oïdium et du mildiou du POD Mildium. En revanche, la formalisation de ces processus n'était que peu avancée et les modes de représentation choisis ne permettaient pas de répondre aux trois besoins identifiés pour la modélisation (communication, opérationnalité, fiabilité). Mon travail a eu comme objectif de répondre à ce besoin en identifiant et en mettant en œuvre le formalisme des Statecharts.

3.5 POD, workflow et modèle d'action

Au cours de cette section, on positionne le concept de POD tel qu'il peut être illustré par Mildium et vis à vis des concepts vus précédemment.

3.5.1 Le POD et les processus métiers

L'intérêt qui est porté ici à la modélisation des processus métier tient à l'identité des objectifs (c'est à dire de représenter un processus métier), mais il tient surtout à sa sémantique formelle. La modélisation de processus métier telle qu'elle est présentée ci-dessus est transposable à une activité décisionnelle, c'est-à-dire à une activité de production de décision. C'est cette similarité de vue qui m'a incité à choisir le terme de DeWS qui est la traduction de la notion de POD.

Pour autant, Mildium ne retient pas tous les aspects d'un processus métier. En effet, dans la phase de développement du POD Mildium, il s'agit d'abord d'objectiver le processus et de mettre l'accent sur les aspect décisionnels, à savoir le « flux de commande »^h pour reprendre le vocabulaire de van der Aalst and van Hee. Le questionnement sur le suivi des ressources matérielles devra venir plus tard. Cette distinction explique mon choix des Statecharts plutôt que des Rdp. Comme l'indique van der Aalst and van Hee (2002) :

Bien que les Statecharts et les Réseaux de Petri soient fondamentalement différents, ils partagent les mêmes caractéristiques. Ce sont toutes deux des techniques à la fois graphiques, dotés de sémantiques formelles et capables de représenter des processus concurrents. Le point de vue des Statecharts est focalisé sur les états et les transitions. Le point de vue des Rdp se concentre sur le flux de ressources (les jetons) et les activités.

in : van der Aalst and van Hee (2002)

Le second caractère commun aux processus métier et au POD Mildium est le caractère opérationnel du processus modélisé. Là où le système de gestion de travail transmet les cas ou dossiers d'un opérateur à l'autre, Mildium produit des ordres de traitements.

Au cours de ma thèse, j'ai fait l'hypothèse que le système de décision tactique était asynchrone de la mise en œuvre. On découvrira au chapitre 6 que les contraintes de ressources et de délais ne peuvent pourtant pas être découplées du raisonnement de la décision. Il y a un caractère critique des décisions prises par Mildium, qui impose des délais de réponses. Ce caractère critique est lié à l'activité de protection des cultures et

h. control flow

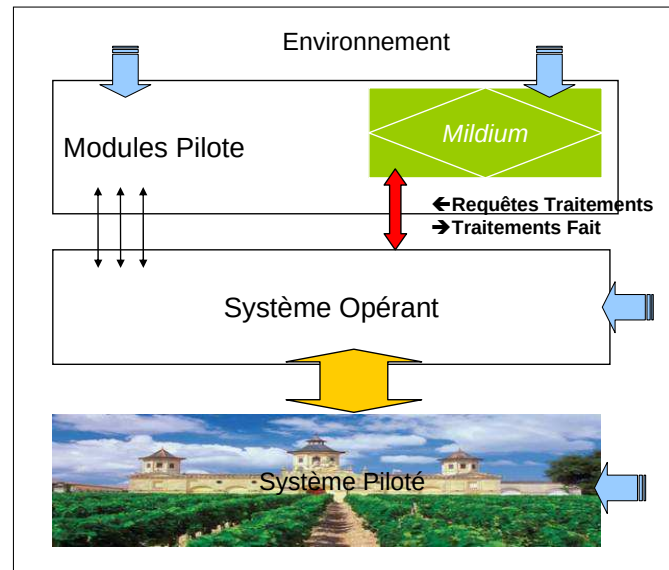


FIGURE 3.6 – L'intégration de Mildium dans le modèle de l'entreprise agricole

aux objectifs de Mildium qui doit à la fois garantir la production et réduire le nombre de traitements, ce qui peut amener à prendre les décisions au plus tard. On évoque en conclusion (chap. 7) quelques pistes qui devraient permettre de conserver l'aspect générique du **POD** tout en vérifiant les propriétés critiques.

3.5.2 Le POD vis à vis de la simulation

Le modèle de Mildium et l'architecture du simulateur qui sont présentés aux chapitres 5 & 6 sont conçus sur la base de l'ontologie développée par [Martin-Clouaire and Rellier \(2002\)](#) comme le montre la figure 3.6. La divergence principale en terme d'architecture concerne la possibilité pour le pilote d'observer le système piloté de manière directe (voir fig. 3.2). Le sous-entendu qui est fait dans [Martin-Clouaire and Rellier \(2003\)](#) est qu'un capteur permet d'observer le système piloté sans coût significatif. A l'heure actuelle, il n'existe pas de tels capteurs en viticulture qui pourraient fournir les informations pertinentes à un système de contrôle des épidémies tel que Mildium. A ce jour, la mobilisation de ressources humaines est requise pour effectuer l'observation au champ.

Ajoutons qu'il y a une différence d'objectif de recherche. Les travaux du BIA fournissent une architecture technique, mais ne posent pas la question de la conception et du recueil des plans stratégiques que la plate-forme de simulation permet de tester.

Remarque : [Garcia et al. \(2001\)](#); [Attonaty et al. \(1999\)](#); [Chatelin et al. \(2007\)](#) ont cherché à combiner simulation biotechnique et découverte de stratégies innovantes. Ils utilisent des méthodes issues de l'apprentissage automatique pour générer des plans et évaluer leur qualité par simulation.

Mon travail se positionne en amont de l'évaluation de performances, que ce soit l'évaluation de stratégies par la simulation *in silico* ou par l'expérimentation *in campo*. Répétons-le : on cherche à élaborer des outils d'aide à la conception de stratégies de

décision, par l'utilisation des outils de la modélisation informatique, de la modélisation d'entreprise et de l'automatique.

3.5.3 Le POD vis à vis du modèle d'action

Si le vocabulaire formel du **POD** Mildium est à rechercher dans les outils de la modélisation d'entreprise, le vocabulaire conceptuel utilisé par les experts relève profondément de celui du modèle d'action. Il est assez étonnant de constater à quel point ceci est vrai pour le **POD** Mildium, alors que cela se vérifie moins pour les designs précédemment mis au point. Ainsi les **RDD** qui avaient été élaborées entre 2001 et 2004 et qui ne concernaient qu'une seule maladie se présentaient moins comme des processus de décisions que comme de simples règles de décision, sans cesse répétées. Il est intéressant de constater le recours de la part d'experts pathologistes n'ayant pas, a priori, la maîtrise du modèle d'action, aux concepts fondamentaux de cette théorie tels que :

Pilotage Stratégique/Opérationnel qui correspond à la notion d'organisation globale de Mildium. Le pilotage correspond également à l'usage coordonné de différentes bases de règles de décision selon la saison de façon à rendre compte : (i) de l'aspect prioritaire d'une maladie sur l'autre à diverse périodes ; mais aussi (ii) de l'alternance entre phases où les traitements sont optionnels, et durant lesquels des réductions sont possibles, et phases où les traitements sont obligatoires, ce qui permet de sécuriser la protection et de resynchroniser les applications.

Phase Le pilotage de Mildium est assuré par l'équivalent de phases de décision qui ont été appelées *étapes de décision*. On peut noter une petite différence entre la notion de phase telle qu'exprimée par **Sebillote and Soler (1988)** et les *étapes*, en ceci que les étapes ne visent pas à réaliser des sous-objectifs spécifiques. En revanche, à chaque étape correspond une rationalité explicite.

Indicateur Le **POD** utilise des variables de décision qualitatives qui correspondent bien aux indicateurs tels qu'ils sont exprimés dans le modèle d'action. Elles permettent d'encapsuler la prise de mesure et les seuils de décision, rendant possible l'adaptation de ces seuils, sans remettre en cause fondamentalement le raisonnement. Au cours de mon travail, je ne me suis que modérément attaché à la modélisation de tels indicateurs et notamment à la modélisation de la manière dont les informations sont mobilisées et organisées. Pour cela, on pourra s'inspirer des travaux de (**Fountas et al., 2006**) qui proposent un formalisme pour mettre en évidence l'usage de l'information dans la prise de décision de l'agriculteur.

Rendez-vous La notion de rendez vous est assez directement retranscrite dans le **POD** avec l'utilisation d'observations au champ qui permet de mettre à jour les variables décisionnelles et les resynchronisations qui s'opèrent à certaines étapes clefs.

Ces similarités laissent à penser que les outils mis au point pour expliciter *ex ante* les stratégies des agriculteurs à des fins de diagnostic, sont également des outils pertinents pour les chercheurs concevant des stratégies innovantes.

Quand viendra le moment de la conception d'un outil d'aide à la décision, plus intégratif qu'un **POD** (qui ne vise qu'un objectif), on aura recours plus directement aux analyses issues du modèle d'action pour permettre une intégration harmonieuse du **POD** dans l'ensemble des stratégies de l'agriculteur.

3.6 Conclusion

Ce chapitre clôt notre analyse critique de l'état de l'art. La modélisation de la décision en agriculture se situe à différents niveaux : gestion stratégique, gestion opérationnelle. A ce niveau, l'aide à la décision proposée dans la littérature fait souvent appel à des modèles biotechniques, mais pour nombre de cultures pérennes, dont la vigne, ces modèles sont insatisfaisants, voire inexistantes. C'est pourquoi il est intéressant de mobiliser la notion de processus, comme cela a été fait dans le cadre de la modélisation d'entreprise, avec les processus métiers. Une prise de décision en **PIC** peut être assimilée à un processus métier de décision, un **POD** dans notre terminologie.

Les bases du **POD** Mildium, ébauchées antérieurement à mon travail de thèse ont également été présentées dans ce chapitre. C'est à partir de cette base que j'ai apporté ma contribution en formalisation des processus. Une première étape a été d'objectiver et d'enrichir ce **POD** par un recueil d'expertise, présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Méthode du recueil de connaissances expertes

Contents

4.1	Introduction	103
4.2	Matériel et méthodes	103
4.3	Présentation de l'article	103
4.4	Expérimentation des Statecharts pour le recueil d'une connaissance agronomique auprès de multiples experts	105
4.4.1	Introduction	106
4.4.1.1	Rationales for the case study	106
4.4.1.2	Choice of formalism	107
4.4.1.3	A team work design	108
4.4.2	Survey of Multiple Experts Elicitation Methods	108
4.4.3	The elicitation method	110
4.4.3.1	Knowledge elicitation process	110
4.4.3.2	The elicitation experiment	112
4.4.3.3	Results	112
4.4.4	Assessing the quality of the elicited knowledge	114
4.4.4.1	A process conformance problem	114
4.4.4.2	Adapting the process conformance problem to Grape- MilDeWS	115
4.4.4.3	Conformance of the model to the DeWS instances	115
4.4.5	Discussion	117
4.4.6	Conclusion and Future work	119
4.5	Discussion du chapitre	120
4.5.1	Mesure d'incertitude	120
4.5.2	Objectivation du POD et recherche d'exhaustivité	121
4.5.3	Éléments de généricité de la méthode de recueil	121
4.6	Conclusion du chapitre	122

Ce chapitre présente la méthode de recueil de connaissances que j’ai mise au point au cours de ma première année de thèse. Un article *soumis*^a à la revue *Expert Systems with Applications*, rend compte de cette méthode. Une introduction en français résume cet article. Il est ensuite retranscrit dans son intégralité en anglais. Une discussion en français prolonge, dans le cadre de la thèse, les réflexions menées dans l’article.

4.1 Introduction

Le **POD** Mildium, même sous sa forme initiale aux spécifications largement incomplètes (voir ann. B), est une ébauche de processus décisionnel. Il s’agissait donc de faire un recueil du processus. Je n’ai pas abordé ce sujet comme un problème de spécification classique en génie logiciel puisqu’il ne s’agissait pas, dans mon cas, de concevoir un système pour *résoudre un problème* mais bien, dans un premier temps de *retranscrire de manière exhaustive* et fidèle, la solution mise au point par les pathologistes (les experts). C’est seulement dans un second temps que l’on se proposait de compléter cette solution par une plus grande richesse de détails.

Notons néanmoins, en ce qui concerne le recueil d’exigences et la spécification formelle pour le génie logiciel, les travaux de Glinz (Glinz, 2002; Glinz et al., 2002) qui définissent un idiome des Statecharts adapté à la représentation des exigences, ainsi que ceux de Svetinovic et al. (2007) qui développent une critique de la méthodologie d’analyse des systèmes par Statechart (mise au point d’un protocole « Vo-ip » dans leur exemple). Ces deux démarches se concentrent sur l’utilisation des Statecharts pour la spécification de systèmes entiers. Ce type d’approche est nettement minoritaire depuis la généralisation de l’approche de la programmation orientée objet et la généralisation d’UML 2.0^b. En effet le Statechart qui, dans l’approche fonctionnelle de ses origines, pouvait servir à spécifier l’ensemble du système (Harel, 1987) est dans UML 2.0 utilisé pour décrire le comportement d’une classe. Notre plate-forme de simulation utilisant un langage à objet (C++), le **POD** est modélisé par un Statechart et une classe UML 2.0 unique. Notre objectif est ici de décrire le plus fidèlement possible le comportement décisionnel des experts avec ce Statechart.

4.2 Matériel et méthodes

Matériel et méthodes sont présentés de manière complète en section 4.4.3.1. Le recueil de connaissances a été effectué auprès de quatre Experts.

- les entretiens duraient environ une heure
- le recueil a été effectué sur la base d’un diagramme Statechart.
- du papier calque et un crayon ont été utilisés pour annoter les diagrammes.
- les entretiens étaient enregistrés avec le logiciel Audacity.

4.3 Présentation de l’article

L’article se compose de la manière suivante : l’introduction replace d’abord les **SED** dans le contexte de la modélisation de processus de production agricole « industriels »

a. le 17/08/2008

b. Unified Modelling Language (UML 2.0) voir <http://www.omg.org>

comme l'un des cadres utilisés (notamment via les DEVS^c de [Zeigler et al., 2000](#)). Ensuite sont présentées les motivations présidant à la conception de Mildium, c'est à dire principalement le besoin d'innovation dans le domaine de la protection des cultures en viticulture (voir chap. 1), ainsi que les objectifs de la formalisation : le besoin d'une explicitation de l'intégralité de la connaissance mise en œuvre par les experts pour pouvoir passer à une étape d'expérimentation plus large et mener des simulations dans le cadre d'une ferme virtuelle. L'introduction se termine par le choix du formalisme Statechart, cette section reprenant en condensé les éléments présentés au chapitre 2 à la section 2.6.

Dans un deuxième temps, les enjeux puis les objectifs de l'article sont précisés :

L'une des difficultés pour la formalisation du [POD Mildium](#) réside dans le fait qu'il s'agissait d'un travail d'équipe. Les membres de l'équipe s'accordaient sur les caractéristiques les plus importantes mais il existait de nombreuses différences sur l'interprétation des détails. Au cours des expérimentations de plein champ, la prise de décision s'est effectuée collégialement. Afin d'explicitier l'ensemble de la connaissance du processus, il m'a semblé que j'obtiendrais une richesse de détails plus grande en procédant à l'extraction de connaissances auprès de l'équipe entière, plutôt que de sélectionner l'un d'entre eux et de ne recueillir que sa compréhension du processus. Les membres de l'équipe avaient conçu le [POD Mildium](#) ensemble et cela aurait été une perte de ne pas tirer avantage de l'apport de chaque expertise spécialisée.

Objectifs de l'article :

La problématique peut être exprimée ainsi : après avoir conçu une solution [PIC](#) pour le contrôle du pathosystème viticole en utilisant une connaissance experte et avoir identifié les Statecharts comme un formalisme de modélisation pertinent, peut on utiliser ce même formalisme pour extraire la connaissance ? En d'autres termes : est-il possible de procéder à un recueil de connaissances, en utilisant des Statecharts comme médiation entre le « cognitif »^d et de multiples experts ?

L'article explore cette question en trois points, (i) en exposant un état de l'art du recueil de connaissances auprès de multiples experts puis, (ii) en présentant la méthode à proprement parler suivie d'une illustration des résultats, enfin (iii) en précisant l'une des méthodes de validation mise en œuvre. Une discussion en forme de retour d'expérience clôt ce travail.

c. Discret Event System(DEVS)

d. en anglais Knowledge Engineer

4.4 Article « expérimentation des Statecharts pour le recueil d'une connaissance agronomique auprès de multiples experts »

Remarque : L'expression *POD* Mildium est traduite en anglais par : Grapevine powdery and downy Mildew Decision Workflow System (*GrapeMilDeWS*) .

Article soumis à *Expert Systems with Applications* le 17/08/2008.

Experimenting Statecharts for Multiple Experts Knowledge Elicitation in Agriculture^e

Bertrand Léger^{*,§} and Olivier Naud^{*}

^{*}Cemagref - UMR ITAP - BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5

[§]INRA - UMR Santé Végétale - BP 81 33883 Villenave d'Ornon Cedex

Abstract

Statecharts were experimented as a mediation tool between multiple experts and a knowledge engineer. After a short survey of knowledge elicitation methods for multiple experts, we present our method for assessing the quality of the elicited model and give critiques on the basis of our case study in vineyards crop protection management.

4.4.1 Introduction

Environmental as well as health issues are getting growing consciousness among the public. Designing processes for sustainable agriculture is therefore a major research goal.

Agricultural production processes have been analysed as industrial processes for almost 20 years now (Sebillote and Soler, 1988). In this context, a tradition for agricultural production process simulation has grown, for example (Attonaty et al., 1994; Cros et al., 2001; Bakam et al., 2001). Many paradigms have been used for this purpose including discrete event system specification (DEVS) (Cournut and Dedieu, 2004). If Ziegler's DEVS (Ziegler et al., 2000) is a well known formalism for simulation, DES (for discrete event system) formalisms have also been shown to be suitable for qualitative analysis and control of various systems (Lunze, 2000).

Our research goal is to represent decision making in crop protection. Although most decision support systems in agriculture are rule based (Shaffer and Brodahl, 1998), our approach is process based and expertise based. We call it a decision workflow system (DeWS). We present here a design aid method for modelling expert decision making procedures, with a representation that belongs to the family of DES formalisms.

4.4.1.1 Rationales for the case study

The present case study deals with French vineyard. Vine growers consume about 25% of the pesticides used in France while vineyards' total area is 3% of the French farmland. Growers have developed intensive and mostly preventive crop protection techniques, because the high quality vine cultivar are highly susceptible to fungal pathogens and outbreaks are difficult to handle. Although pesticide use reduction efforts have been carried

e. Some materials used in the present article have been presented previously at the IFAC-MCPL2007 conference.

out, further development toward sustainable viticulture requires innovative protection methods. Integrated Pest Management (IPM) is one of those. IPM aims at reducing the amount of inputs while keeping the revenue of farms, through the use of biological control as well as pesticides when necessary (Kogan, 1998). Unfortunately, so far no biological agent has been made available against the main fungal pathogens to satisfy the production targets and the complexity of the grapevine pathosystem (i.e. crop + pathogen + climate). In addition, current lack of detailed epidemiological knowledge does not allow computation of optimal solutions for the design of minimal pesticide strategies. Therefore, pest management procedures need to be designed based on expertise.

An expert based IPM solution was designed by a team of phytopathologist experts from INRA plant health research unit (Bordeaux). We named it “GrapeMilDeWS” (Grapevine powdery and downy Mildews Decision Workflow System). GrapeMilDeWS aims at controlling two of the prevailing vineyard diseases: powdery mildew (*Erysiphe necator*) and downy mildew (*Plasmopara viticola*). It is based on the following hypothesis: knowledge and information can help to substitute numerous and systematic treatments.

GrapeMilDeWS was originally described with a set of guidelines, relying to a large extent on the personal (implicit) knowledge of its expert designers for implementation. It was experimented in the vineyard and demonstrated its efficiency with satisfactory harvest results and reduced number of phytopharmaceutical treatments (Cartolaro et al., 2007).

Formalising this DeWS should allow all necessary hidden knowledge to be made explicit. Modelling had indeed two objectives. First, the formal model would allow others phytopathologist to implement the decision process, thus permitting large scale experimentations. Second, a formal model can be used for computer simulations not only at the process’ plot level but also at the farm level, for instance, to check for resources use, workload and induced costs at a larger scale. Finally, the formalisation process should also provide reflexive insight to the designer, allowing them to explore new design alternatives.

4.4.1.2 Choice of formalism

In GrapeMilDeWS, the continuous behaviour of the pathosystem controlled by the crop protection process, are discretised in abstract variables which encode for low, moderate and high disease risk. Thus fed with discrete input, GrapeMilDeWS is modelled as a DES.

GrapeMilDeWS includes the user (or human being) in the control loop. For instance, the disease level are evaluated by workers in the vineyard. This information is aggregated in synthetic discrete values. In reaction to external events, transitions are fired, which generate internal and output events. The output events are decisions for action to be carried out on the system by human operators.

We chose to represent GrapeMilDeWS using a graphical language, i.e. Statechart, introduced in (Harel, 1987). As said by Harel, Statecharts can be described as enriched finite state automata (FSA):

$$\text{statechart} = \text{state-diagrams} + \text{depth} + \text{orthogonality} + \text{broadcast-communication}$$

- *State-diagrams* are graphical FSA in the sense of both Mealy and Moore machines (Harel and Pnueli, 1985).
- *Depth* is the capacity of hierarchically encapsulating a statechart inside a state; this enable us to avoid confusing details and to get a more abstract view.
- *Orthogonality* is the ability to represent multiple concurrent processes in the same statechart, which is the main feature of statechart responsible for preventing the exponential growth of the state space as the systems complexity increases.
- *Broadcast communication* represents the way events are made available simultaneously to all elements of the statechart. This feature is powerful although it leads to formal difficulties in the implementation which are generally managed through various “flavours” of pseudo-synchronicity of the events (Maggiolo-Schettini et al., 2003). The original version of statechart, was implemented with broadcast communication over the whole system. However, in the UML object oriented version of statecharts, the inter-object communications are point to point (Damm et al., 2003).

We used Telelogic’s Rhapsody statecharts (Harel and Kugler, 2004) for our modelling. Rhapsody implements a variant of the UML object semantic of statecharts. As all versions of statecharts are not equivalent, one should refer to (Crane and Dingel, 2007) and for an earlier, exhaustive view of statechart variants to (von der Beeck, 1994).

4.4.1.3 A team work design

One of the difficulties for the formalisation of GrapeMilDeWS was that the design was a team work. The team members agreed upon the most important features, but there were many differences in their interpretation of the details. During the field experiments the decision making was done collegially. In order to make all of the process’ knowledge explicit, it seemed that we would get richer details if we elicited the whole team, instead of singling out one of them and capturing his understanding of the process. They had designed GrapeMilDeWS together and it would have been a loss not to capture each specialized expertise’s input.

Objectives of the paper

The question can be stated: once an IPM solution for controlling the vine pathosystem has been designed using expert knowledge and statecharts have been identified as a pertinent modelling formalism; what is the method to elicit the knowledge from the experts? In other words: *can knowledge elicitation be done carried out using Statechart as a mediation model between the knowledge engineer and multiple experts.*

The paper will explore this hypothesis first by reviewing the literature on knowledge elicitation techniques involving multiple experts. The following section will present our elicitation method and its implementation in our case study. An evaluation of the quality of the elicitation is given in section 4.4.4. Before concluding, we discuss our experimental results.

4.4.2 Survey of Multiple Experts Elicitation Methods

The expert system community introduced knowledge elicitation of multiple experts as a scientific question. It is still a complex task, we give here a short presentation of

what is at stake. Acquiring knowledge from multiple experts has many pros and some cons. For instance, it may spare the necessity to find a domain “omniscient” expert, who would be replaced by a group of sub-domain specialists. The resulting global expertise would thus be wide and deep (i.e. detailed) and often with reduced access cost to expertise. On the other hand the cons range from schedule difficulties to power plays. If not properly managed, the latter may overcome the advantages (Chopra et al., 2000; Medsker et al., 1995).

When working with multiple experts the knowledge is generally distributed between the individuals according to three different configurations: either (i) the experts work together as a team; or, as in most cases, (ii) they are concurrent on a single “shared” competence domain; last, (iii) the expertise on a domain is spread: each expert holding partial expertise, with potential overlaps or knowledge gaps (Chopra et al., 2000; Medsker et al., 1995).

In case of concurrent expertise, the opinion of experts may diverge. Hameed et al. (2002) present a survey of the various classification grids that were proposed to analyse the discrepancies between experts, explaining how and why experts disagree or do not understand each other. Handling discrepancies between the experts’ opinions can be tackled using the following strategies: (i) the *Tsar strategy*, giving the final word to a single expert; (ii) the *satellite strategy* which relies on one expert for most of the elicitation process but at times may turn to satellite experts for deeper insights on specific questions; finally (iii) the consensus is often pursued. The experts are generally asked to build consensus themselves, but some knowledge engineers developed automated consensus building methods (Barrett and Edwards, 1995; Gaines and Shaw, 1993).

Chopra et al. (2000) explain that “it is [...] possible to develop a consensus model of expertise through an iterative process of individual elicitation on a set of elements, assembly of the results and re-elicitation on the new set of elements”. When experts are geographically dispersed, the Delphi method offers a solution using an iterative process over questionnaires. In use since the 1960’s, this method has been thoroughly tested (Landeta, 2006). With the development of the internet, computer aided solutions (Mendonca et al., 2000) are a second alternative. Yet individual interviews remain the most efficient way of acquiring detailed knowledge, while group sessions are conducted with the goal to foster creativity (Chopra et al., 2000).

Elicitation can be performed using a number of techniques (Cannon-Bowers and Blickensderfer, 1993) and using different ones in the same process is recommended (Barrett and Edwards, 1995). Nowadays, a number of software suites offer many methods and tools (PROTEGE, 2007; PCPACK, 2007). Complete methodologies such as CommonKADS (Schreiber and Akkermans, 2000) or MOKA (Brimble and Sellini, 2000) have been developed over the last decade, and are advocated even outside of the knowledge management community (del Aguila et al., 2001).

Graphical methods have the great advantage to be both a graphic representation, with all the advantages of graphic variables (Bertin, 1973) as well as a mathematical model that

can be worked on with such methods as graph grammars or edge based metrics (Chopra et al., 2000). Interestingly, Statecharts have been tested in the field of psychology to represent people's mood, and turned out to be the panel's favourite elicitation technique (Milton et al., 2006). However using a graph as a media between experts and knowledge engineer is still controversial: Frederiks and van der Weide (2006) advocate for textual intermediation, whereas Ford and Sterman (1998) give a concrete example of a method using graph as the elicitation medium as well as the final result representation. In fact, graphical representations are primarily used to communicate final results (Chopra et al., 2000; Milton et al., 2006).

4.4.3 The elicitation method

Our method uses "intermediate knowledge models" in an iterative elicitation process, to ensure the mediation between the phytopathologists, designers of the GrapeMilDeWS, and the Knowledge Engineer (KE). These models are deemed "intermediate" because they allow us to go from an implicit knowledge to a "well formed automata" (i.e. models that may eventually be executed). Indeed, the modelling has two purposes: *transfer of skills and knowledge* and *validation of the expert-based decision process* with tools such as model-checking and simulations.

4.4.3.1 Knowledge elicitation process

Most of the elicitation process is carried out through individual interviews of about one hour. Group sessions may also be setup. The KE prepares the subject of the interview and the documents needed.

A round consists of interviews of each expert and a synthesis is done to close the round after everyone was interviewed once. Rounds are repeated until more interviews do not improve the knowledge and the consensus level is high enough.

We define two kinds of statecharts. Let's call *diagrams* the "intermediate knowledge models" presented earlier. They are qualitative statecharts we used during expert interviews. Let's call *models* the formal statecharts we simulate with Rhapsody. *Diagrams* are informal statecharts oriented towards communication. They have to be understood by both the KE who writes them and the experts who are interviewed. On the other hand, the *models* are the complete computer implementation of the *diagrams* and can be executed in a simulator. The model will react to inputs and produce decisions of the same nature as that of the experts' ones.

Two kinds of diagram coexist at one time: the *admitted diagram* which is the current synthesis built in the previous round and the *individual diagram* which accounts for the work in progress incorporating the modifications from the individual interview of an expert onto the *admitted diagram*. Fig.4.1 summarizes the organization of interviews in rounds, and how the material generated at one round is used as basis for the next.

The changes proposed by the expert during an interview may be an addition, a deletion or a modification of several statechart elements.

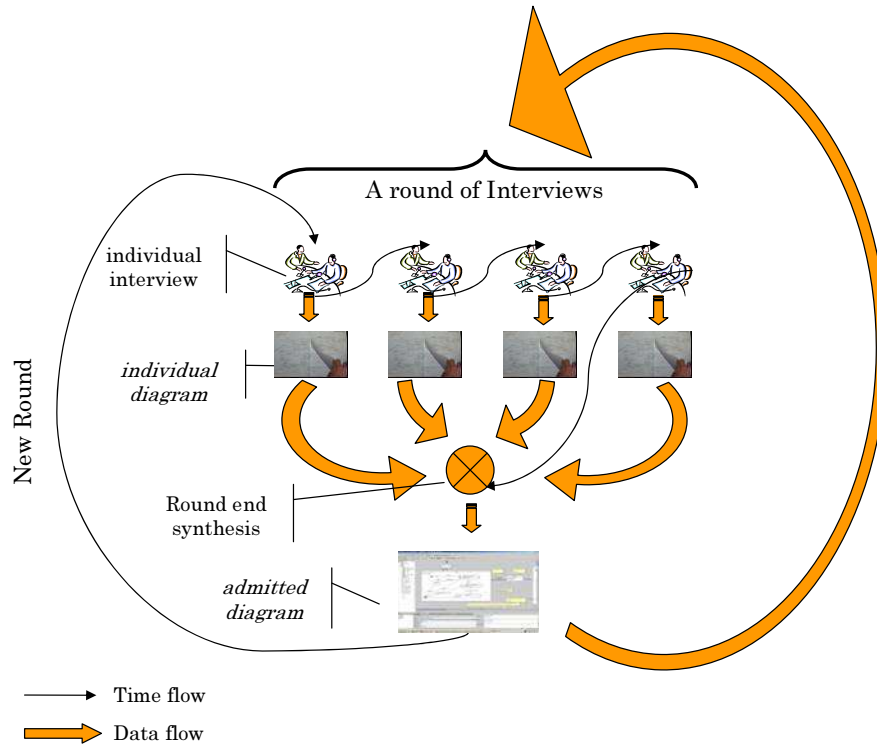


Figure 4.1: Rounds of interviews. The *individual diagrams* output after each interview are synthesised into the admitted diagram. The following round elicits more information on the basis of this *admitted diagram*.

Interviews shall pursue two goals. The first goal is to validate the admitted diagram. The idea is that the experts have a common understanding of GrapeMilDeWS. Therefore the level of consensus is supposed high enough so that most of the process would be agreed upon.

The second goal of the interview is to foray deeper into the details of the process. This deeper investigation allows the expert to build up on the settled knowledge from the previous rounds . The interviews are integrally recorded and an individual diagram is edited after each expert's interview.

Round Synthesis After each expert has been interviewed, the KE synthesizes the individual diagrams into a new admitted diagram. The synthesis is done mostly with the majority rule but in some cases, the KE uses his judgement to validate information that may not have the majority, but seems most likely to be the underlying truth^f. Doing so, the KE has to make sure that the experts validate his intuition in the following round. When faced with divergent opinions or ill-defined concepts, the KE has to gather all the experts in a group session.

Synthesis was carried out manually, nevertheless it is theoretically possible to design an automated synthesis algorithm, using graph distance (Bae et al., 2006) and equivalence of the automaton using bisimulation (Massink et al., 2006).

f. we will come back to this in the discussion

Group sessions There is no specific procedure defined for group sessions. All the experts are invited. The goal of such sessions is to quickly settle points of discrepancies which could not be synthesized using the interviews information. It can also clarify ill-defined concepts on which individually the experts would not take a stance. After such meetings, individual validation is carried out at the next round.

4.4.3.2 The elicitation experiment

Four experts composed the team. They hold different hierarchical positions in their organization and have had different levels of involvement during the design of GrapeMilDeWS and the experimental phase. Even though the original hypothesis was that the expertise was evenly shared among experts, the possibility of finding some specialization in the knowledge had to be acknowledged. Although all experts have a thorough knowledge of both diseases and of GrapeMilDeWS' principles, their personal involvement on each of these aspects was not equivalent. For instance Mr Pow. is a known powdery mildew expert and was more concerned about this disease. The other experts also tended to align their stance to his when questioned about powdery mildew.

The KE had preliminary discussions with all the experts. Based in these discussions and the documents available, a first informal statechart *diagram* was designed. The entire elicitation process was completed in four rounds of four interviews each. The two first rounds were done within a two week time. The experts were interviewed according to their schedule. That was an issue, for instance Mr Dow. was interviewed twice in a row: last in round 1 and first in round 2. During the last two rounds, scheduling was even harder: at one point, two interviews had to be performed in a day with the risk to bias an interview with the other. The last two rounds were performed in a three week time. The total time for the 16 interviews was 19 hours. Between rounds 1-2 and rounds 3-4, two group meetings were performed with the four experts. They lasted approximately two hours each.

4.4.3.3 Results

Excluding the preliminary diagram, 16 diagrams were designed, one for each interview. For each round, an admitted diagram was designed synthesising the 4 diagrams created during the round. Two formal models were created, one from the admitted diagram after round 2, and the other one after round 4.

Short description of elicited model for GrapeMilDeWS The DeWS process breaks down in 7 stages which alternate with 3 evaluations (see fig.4.2). The statechart has been simplified for the publication. An evaluation is an activity state during which GrapeMilDeWS waits for data to be updated. A stage is a global decision state. In each state a sub-statechart displays the decision logic (see fig.4.3 with Stage_4 as an example).

Nonetheless, a stage is also a temporal period defined by the phenology or by temporal conditions relative to GrapeMilDeWS' sequence of actions. For example, Stage_3's activation is triggered by the flowering and its exit is triggered by the end of the active period⁸ of the third treatment. Stage_3's exit is dependent of the third treatment and of the choice of products, factors which are controlled by GrapeMilDeWS' decisions, i.e.

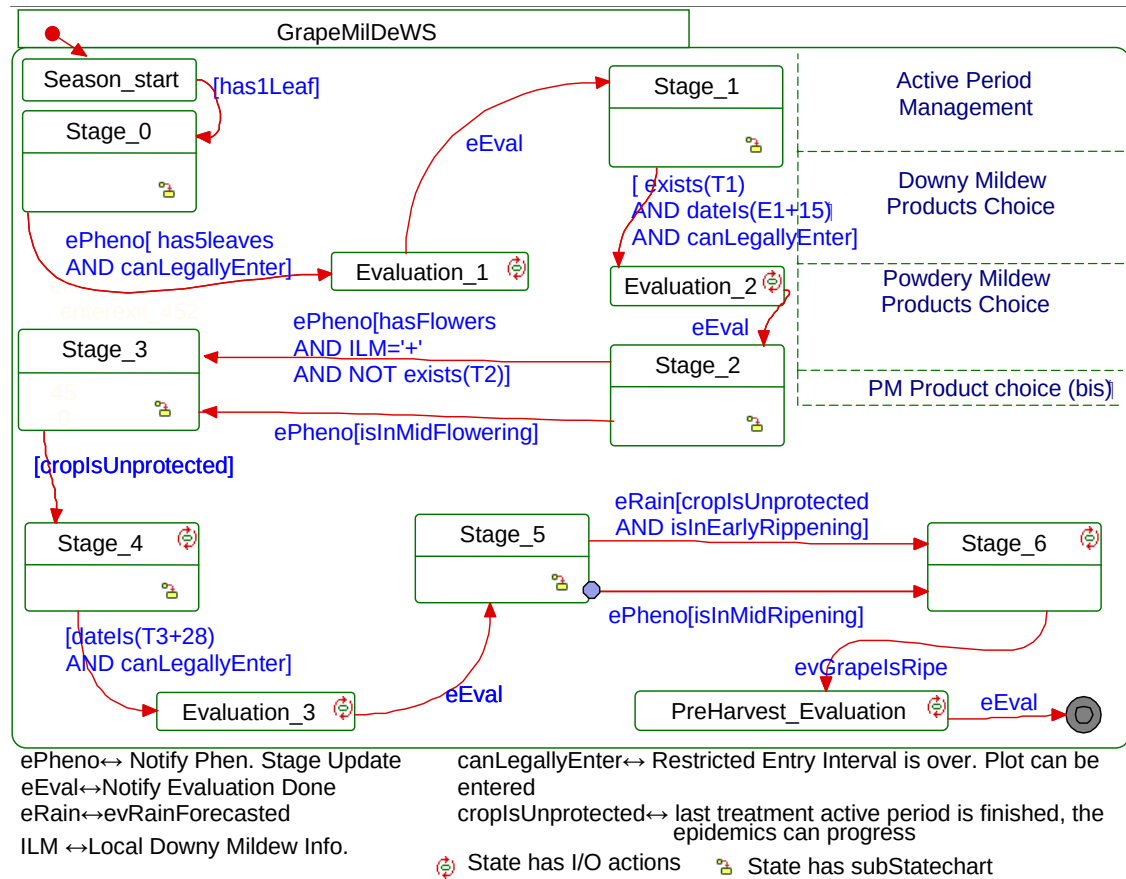


Figure 4.2: Main steps of the GrapeMilDeWS process for a cultural season

endogenous data whereas its entry is triggered exogenously by the phenological stage (see fig.4.2).

The choice of cutting the crop protection season in independent decision stages is novel in IPM and permits fine tuning the decision making strategy at each stage. The treatment decisions in the stages are taken according to three aggregated estimators. Two of them (O and M) are respectively, estimates of the level of powdery and downy mildew updated in the plot during the evaluations. The third estimator, ILM (for local downy mildew information), is provided by the plant health information services. It is updated by this exogenous source of information while the other two depend on GrapeMilDeWS for triggering their update(see fig.4.3).

GrapeMilDeWS models a control system, based on elicited expertise. It manages neither the operational resources needs nor the response of the vineyard. It is designed to simply “throw” requests, which the operational system (i.e. the grower) may fulfil “at its will”. In return GrapeMilDeWS receives notifications about execution of requested actions (either evaluations or treatments). This design choice is realistic in viticulture as crop protection holds priority over all other activities. Thus the model is thought to be able to abstract from resource and priority management with little discrepancies.

g. Period after which the efficiency of the product is no longer guaranteed

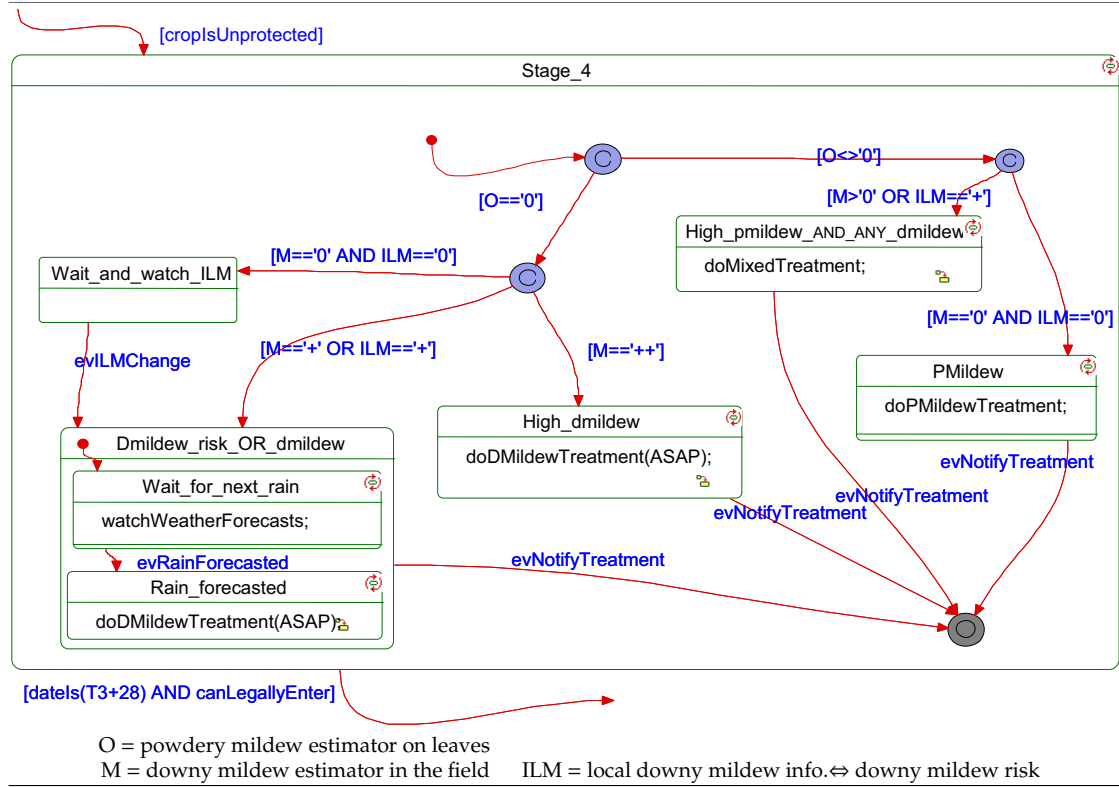


Figure 4.3: Details of Stage_4

4.4.4 Assessing the quality of the elicited knowledge

4.4.4.1 A process conformance problem

After the elicitation was completed, the output *model* was marked as a stable version. Assessing the quality of the elicited model was needed to confront the elicited knowledge with the experts' actual practices during the experiments. This may highlight important facts that did not appear during the elicitation process or that the experts may not have been fully aware of.

The *GrapeMilDeWS* process had been tested for a couple of years prior to the formalisation described here. These tests were thus chosen as reference data to assess the *model* against. Checking the validity of a DeWS is a *process conformance* problem. Rozinat and van der Aalst (2008) tackle such conformance problems in a Petri Net (PN) workflows modelling framework. They play back the logged traces of the process execution into the PN and counting the tokens^h that need to be added to or removed from the workflow model for it to reproduce the behaviour recorded in the logs. Edition count is thus an estimate of the conformance between the modelled workflow and the instance trace. We have adapted Rozinat and van der Aalst's approach by *replaying* the experiments' decision logs in the *GrapeMilDeWS* Statechart.

h. Petri Nets states are represented by the configuration of tokens into a graph of places and transitions.

4.4.4.2 Adapting the process conformance problem to GrapeMilDeWS

We shall start by making analogies. Statechart models are systems which react to their environment and communicate through events. Here the experiments decision maker team (i.e. the experts) are assimilated to GrapeMilDeWS (i.e. its statechart representation). During the experiment, they communicated with the experimental vineyard manager using two kinds of messages: treatment requests and evaluation requests which we map onto GrapeMilDeWS' external events interface.

The experimental vineyard manager is seen as part of GrapeMilDeWS' surrounding environment. He was in charge of carrying out the orders from the experts. He sent execution notification messages in return to the experts' requests. These messages are mapped as evaluation and treatment execution notification events.

Because of the organisation of the work between the decision maker team and the vineyard manager, GrapeMilDeWS and its environment are modeled as asynchronous processes. GrapeMilDeWS was designed not to control the timing of its requests' executions.

For simplicity, we solely present here the replay of the main process. The product selection rules and active period monitoring were added for consistency. We abstracted ourselves from GrapeMilDeWS' other concurrent processes and internal communications. In this simplified framework, notifying an evaluation provides immediate update of the variables with no need for extra communications. The replays were done manually following Algorithm 1.

```

Data: Field experiments traces; GrapeMilDeWS Statechart model
Result: A chronogram : see Fig.4.1

Map Experiment traces onto GrapeMilDeWS' events and variables;

/* On a chronogram over the season */
foreach day do assign the day's events and set the variable values;
foreach day do
    if input or output events exist then
        Estimate current Stage;
        when treatments are ordered : select treatment product;
        Generate unrecorded output events;
foreach day do Compute the remaining active period length;
foreach day do
    Deduce and Set substates from Variables, AP, rain forecasts;
    Mark uncertainties;
    Check constraint conformance, try modifying states to fulfil conditions, otherwise mark discrepancies;
foreach day where uncertainties and discrepancies exist do Make consistent hypothesis (on Pheno, AP or ILM) to solve uncertainty or discrepancy;
    Mark remaining as Errors;

```

Algorithm 1: Replay a field experiment decision traces into main process state space

4.4.4.3 Conformance of the model to the DeWS instances

We have processed the data from 16 experiments (8 plots, 2 years) with above-mentioned algorithms. However, we will illustrate the replay results of the experiment into the statechart with a single example: Table 4.1. This table represents a typical output

2006 Lat. M(10-18)												
#	Phenology	APD	APP	M	O	Og	ILM	Date	Transition Trig. Cond./ Output Events i/o	Current State	Treatment target.	
1	<15	0	0					Mon 01/05		Stage_0		
2	[15;20]	0	0					Thu 04/05	(hyp)evNPSU[PhenStage>=15]	> Evaluation_1		
3									evDoEvaluation	< Evaluation_1		
4				0	+		0		evNotifyEvaluationDone	> Stage_1.1		
5		0	0	0	+		+	Tue 09/05	evILMchange	> Stage_1.2.1		
6	[15;62]	0	0	0	+		+	Tue 16/05	evRF	> Stage_1.2.2		
7									evDoMixedTreatment	< Stage_1.2.2		
8		14	14	0	+		+	Wed 17/05	evNotifyTreatmentDone	> Stage_1.final_State1	T1=D&P	
9		12	12	0	+		+	Fri 19/05	(hyp)[dateE10+15]	> Evaluation_2		
10									evDoEvaluation	< Evaluation_2		
11		9	9	+	+		+	Mon 22/05	evNotifyEvaluationDone	> Stage_2.1.1		
12	>62	2	2	+	+		+	Mon 29/05	(late BBCH>62) evNPSU[PhenStage>=60]	> Stage_3.1		
13									evDoMixedTreatment	< Stage_3.1		
14	]62;80]	0	0	+	+		+	Wed 31/05	[timeout(INTERVENTION_DELAY24_48H)]	> Stage_3.1		
15		14	14	+	+		+	Thu 01/06	evNotifyTreatmentDone	> Stage_3.Final_state3	T3=D&P	
16		8	8	+	+		0	Wed 07/06	evILMchange	> Stage_3.Final_state3		
17		3	3	+	+		0	Mon 12/06	(3d early)[cropIsUnprotected0]	> Stage_4.1		
18									evDoMixedTreatment	< Stage_4.1		
19		14	14	+	+		0	Fri 16/06	evNotifyTreatmentDone	> Stage_4.Final_State4	T4=D&P	
20		2	2	+	+		+	Wed 28/06	evILMchange	> Stage_4.Final_State4		
21		1	1	+	+		+	Thu 29/06	[treatmentDate(T3)+28]	> Evaluation_3		
22									evDoEvaluation	< Evaluation_3		
23				+		0			evNotifyEvaluationDone	> Stage_5.1.1		
24									evRF[cropIsUnprotected(dm)]	> Stage_5.1.2		
25									evDoDMildewTreatment	< Stage_5.1.2		
26		14	0	+		0	+	Fri 30/06	evNotifyTreatmentDone	> Stage_5.Final_State5	T5=D	
27	>80	0	0	+		0	+	Tue 18/07	(early BBCH<85) evNPSU[PhenStage>=85]	> Stage_6		
28									evDoDMildewTreatment	> Stage_6		
29		10							evNotifyTreatmentDone	> Stage_6	T6=D	

Phenology is the known Phenology on BBCH scale;
M is the downy mildew assessed on leaves variable;
ILM is the area downy mildew risk estimate variable;
APD is the Active Period against Downy mildew;
APP is the Active Period against Powdery mildew;
O is powdery mildew variable assessed on leaves;
Og is the powdery mildew assessed on bunches;
Transition Trig. Cond./ Output Events: the transition labels (triggering event + guard condition) are followed by the incoming i/o symbol '>' and Output events are followed by the outgoing i/o symbol '<';
Current State is the active state name from the main process;
Treatment target indicates which treatments target which disease.
evNPSU stands for evPhenologicalStageUpdate;
evRF stands for evRainForecasted.

Table 4.1: Projection onto the GrapeMilDeWS state space of decisions taken in 2006 on plot Latresne Merlot

of the replay process. It has been summarized to show only the days where the system's current state evolves. Therefore most of the season's days are hidden although they are defined (e.g. the AP is decremented on a daily basis).

Note, that the phenology was imperfectly known, thus on Tab.4.1 the known phenological data are given as ' $> x$ ' or ' $< x$ ', whereas the uncertain phenology is given as intervals.

Note also, the bold lines which emphasize the marked uncertainties/discrepancies (see algo.1). In parenthesis are the reasons for the line to be marked.

For instance, Tab.4.1-L.2 column *transition trig. cond.* reads: "(hyp) evNPSU $>$ ". We knew that the evaluation had been done on that date, so we made the hypothesis that the phenology was 15 (5 leaves unfolded) that same day. This hypothesis permitted to satisfy a constraint without contradicting any fact.

Yet phenology is not the only case where hypothesis had to be made. For instance, the second evaluation (Tab.4.1-L.11) which triggers the entry into Stage_2, was actually performed 18 day after the first evaluation (Tab.4.1-L.4). Yet, the formal model requires that Stage_1 be exited 15 day past the first evaluation. To prevent a conflict between the experiment and the model, we made the hypothesis that Stage_1 had been duly exited and Evaluation_2 entered on May 19th (Tab.4.1-L.9), making the sequence consistent with the transition guard (see Fig.4.2): *[exists(T1) AND dateis(E1+15) AND canLegallyEnter()]*. We also assumed that the request for the evaluation had been sent (Tab.4.1-L.10), but that for four days, no action had been performed on the plot (keeping in mind that the operational management and the crop protection management are asynchronous processes). Finally it is a sure fact that on the 22nd the answer came back (evNotifyEvaluationDone) and therefore Stage_2 was entered (Tab.4.1-L.11).

When no hypothesis could be made to have the traces and the model fit, we recorded the discrepancies and identified its nature, as is the case on June 12th when the order for a treatment corresponding to Stage_4 was issued even though the condition to exit Stage_3 (i.e. *[cropIsUnprotected()]*) was not yet true (Tab.4.1-L.18): as APD & APP > 0 , the active periods are not over and the crop is not yet unprotected. We marked the discrepancy and considered the system to be in Stage_4 since the next action was to request a treatment which was required according to the variable values (see (Tab.4.1-L.17 and Stage_4's statechart on fig.4.3).

With the process roughly presented here, we were able identify repeated discrepancies such as early entry in Stage_4 or early treatment at Stage_6 on a particular year. It was also highlighted that some constraints were repeatedly broken. We shall discuss these findings in the next section.

4.4.5 Discussion

The process of elicitation presented in section 4.4.3 is our matured proposal. During the elicitation process, we encountered a number of difficulties that required adjustments.

For instance, due to the size of the model, the expert did not have the time to go through the whole statechart in the one hour interview time. The solution we adopted was to work in parallel both on validation and detail acquisition, but on parts of the model. The KE focused an interview on 2 to 3 Stages for validation and on 1 or 2 Stages

for knowledge acquisition. This was done making sure that an expert was not validating his own input from the previous round.

Barrett and Edwards (1995) warn against the tendency of experts to over rationalise their discourse. For example, a phenological stage was given as the condition for the transition between the first stage and the second evaluation. Yet the real constraint was in fact just a 15 day period between the first and second evaluation. This could be discovered only because the elicitation was pushed into deep details, examining specific input scenarios and because greater familiarity between the experts and the KE had been achieved. When confronted with such case of over rationalisation, we considered, when making a round synthesis, that the KE should not abide by the majority rule too strongly. We chose the information from the expert who gave the true condition and then had the other experts validate that point in the next round.

Admittedly, working directly on statecharts may have slowed the process of “coming to the truth”. We had chosen, in the first place, to expose a lot of the implementation details of the formal specification to the experts with the idea that in this way they would be in close control of the formalisation of their expertise. The experts actually did not feel comfortable with the statechart diagrams and we believe it is partly due to too much formalism.

Glinz (2002) proposes a simplified semantics of Statechart for requirement elicitation. Our first idea was that the experts wanted a formal model to clarify their ideas but we found out that too much mathematical formalism was actually dumbing them down. In the latter part of the elicitation process, a more natural language was introduced in the statechart by encapsulating the implementation details. Hence elicitation through statecharts became easier. After changing to a more natural language on the labels of the transitions, we have seen some of the experts actually becoming more agile with the formalism. One was even able to take the pencil and make correction by himself.

In the end, having the admitted diagram as the basis for the model implementation made it very easy to implement and may have counter balanced the extra elicitation time required by the use of too formal statecharts early in the process.

The elicited process was assessed with the replay method presented in section 4.4.4. One of the difficulties in replaying the experiment traces into the statechart, was to build a partial order on the events that take place on the same date. The crop protection was recorded with a daytime granularity although more than one event could take place on the same day. Automating this task with a generic algorithm would have been very difficult if not impossible. However, we did the replay manually and we knew the logical sequence of events (evaluation request > evaluation notification > treatment request > treatment notification). Therefore we are able to replay the chain of transition on a same day from a stable situation changed by an input to a new one added by some output (see (Tab.4.1-L.22 to 25).

The replay results helped us point out the discrepancies (section 4.4.4.3), such as repeated constraint breaks at various stages and the early treatments at Stage_4. These constraint breaks were explained by the fact that the experts resynchronised the various plots. Early treatments at Stage_4 showed that the experts anticipated certain decisions.

This points out a limit of the Statechart modelling language: it is a reactive system modelling language therefore ill fitted for anticipation (a common practice for operational managers).

Anticipation and synchronisation practices were not mentioned during the elicitation because *GrapeMilDeWS* was designed as a generic crop protection procedure abstracted from the operational constraints. However, when experimenting, the experts could not free themselves entirely from these operational constraints.

Highlighting these two points shade another light on the DeWS and helped the experts better analyse the process they had designed. It gave them food for thought for improving the future version of *GrapeMilDeWS*. We believe, that the elicitation method we have presented here is efficient in an incremental design methodology along with field experiments.

4.4.6 Conclusion and Future work

The improvement implemented in the latter part of the elicitation is comforting the possibility of using Statechart for process knowledge elicitation. This allowed us to move rapidly from expertise to formal models with little in between transformations. The process can be efficiently run when

- running multiple iterations of expert interviews
- expressing the constraint in natural language
- validating and acquiring details working on the last admitted diagram at each round
- setting up group meeting when the elicitation is vague from all participants; the experts probably need to clarify their concepts

However the lack of simple introspection mechanism in the statechart language, made anticipation difficult to represent. We would recommend the use of one of the many timed automata formalism, e.g. (Alur and Dill, 1994), to the decision and action periods. The non-determinism of these formalisms would be appreciated by the experts who were not comfortable with the strict timing constraints required in standard Statechart. Decision making is a versatile activity, and experts' favourite expression is : "it depends". Non-deterministic timed automata permits to both apply formal verification technologies and yet capture the temporal uncertainties for the decision making.

The next step is to formalise a method for synthesising diagrams. Ways must be found to compare statecharts models and to define equivalences between them. From the practitioner's point of view, finding a robust synthesis method to handle informal elicitation diagrams about temporal processes would also be a useful research.

We would like to thank the domain experts: Michel Clerjeau, Philippe Cartolaro, Lionel Delbac, Laurent Delière, for their time and assistance.

4.5 Discussion du chapitre

L'objectif principal de recueil et de formalisation de l'expertise a bien été atteint grâce à l'utilisation de statecharts comme médiation entre les experts et le cogniticien.

Au-delà de la démarche présentée dans l'article et des conclusions qui en découlent, on s'interroge sur trois autres aspects : d'abord la représentation de l'incertitude dans le modèle du **POD**, puis l'objectivation du **POD** et l'exploration de son espace d'état et enfin on évoque la généricité de l'approche de recueil des connaissances par les Statechart.

4.5.1 Mesure d'incertitude

Un des objectifs initiaux du recueil était de modéliser l'incertitude (le protocole prévu initialement est donné en annexe C). Certains des objectifs initiaux ont été abandonnés mais les principaux ont été conservés.

La mesure de l'incertitude a été abandonnée pour plusieurs raisons. J'avais estimé qu'il serait facile de gérer l'ajout et la suppression d'éléments du modèle associé aux déclarations des experts. Toutefois, les experts ne se sont pas appropriés le formalisme Statechart aussi aisément que prévu initialement (section 4.4). *In fine*, les idées développées par les experts ne se traduisaient pas « naturellement » en états, transitions ou conditions. Le passage d'un concept expert à sa retranscription sous forme Statechart est en effet lié à l'interprétation qu'en donne le cogniticien modélisateur et au choix d'organisation du modèle préalablement arrêté. Ainsi une nouvelle information, même très simple pour l'expert, peut amener le modélisateur à revoir profondément la structure du modèle alors que d'autres informations qui, elles, modifient grandement le comportement du processus modélisé, peuvent être retranscrites simplement par la modification d'une condition. Cette question relevait de la relation entre la sémantique experte et la sémantique du modèle, sujet trop vaste pour que j'entreprenne de la formaliser.

J'ai donc procédé empiriquement pour effectuer la synthèse des apports de chaque expert au terme de chaque étape. Je me suis appuyé sur la compréhension du processus acquise au cours des quatre entretiens composant le *round* et les notations reportées sur les diagrammes individuels. Scholz (2001) propose, à partir de ses travaux sur les μ -chart (Scholz, 1998), une méthode incrémentale qui garantit mathématiquement que, d'une étape à l'autre, le modèle gagne en détail et que le comportement n'est pas modifié mais seulement précisé et permet d'aboutir à une spécification complète. Cette méthode structurée peut être utilisée pour aider le modélisateur, mais doit être adaptée au contexte du recueil de connaissances avec de multiples experts. En effet les experts émettent parfois des informations contradictoires ou remettent en cause le consensus précédent (ce que confirme la littérature : voir section 4.4.5). Or la procédure de Scholz n'est pas conçue pour gérer les évolutions d'exigence impliquant des changements de comportement du système.

L'autre argument qui explique l'abandon de la mesure de l'incertitude, est que le **POD** Mildium étant une solution innovante, on a souhaité produire une forme « canonique » explicite du système afin de la communiquer aisément et de permettre à d'autres chercheurs de s'en saisir. Introduire des mesures d'incertitude aurait rendu le modèle plus complexe à représenter et plus difficile à transmettre.

Cet argument peut également être invoqué à propos du choix de l'utilisation d'un idiome déterministe des Statecharts plutôt que d'une version temporisée du langage. Il semblait plus avantageux *a priori* d'avoir un système très directif comme première approximation puis de le relaxer en introduisant de l'incertitude. Cette hypothèse s'est avérée contraignante dans le recueil de connaissances comme nous l'évoquions dans la section 4.4.5, car elle a forcé les experts à faire des choix arrêtés là où « des degrés de liberté temporels » existaient. On verra les conséquences de ce choix dans le chapitre 6.

4.5.2 Objectivation du **POD** et recherche d'exhaustivité

Initialement, deux types de jeux de rôles étaient prévus pour vérifier la cohérence du recueil et pour explorer plus avant. Le premier type devait proposer des scénarios de condition (par exemple : M='+' et O='++' au stade 18) avec comme objectif de valider la cohérence interne du modèle. Ce premier type de jeu a été abandonné car le contrôle de cohérence a été réalisé par les experts dans la première partie des entretiens. (version du protocole de recueil présentée dans l'article)

Le second type de jeu devait permettre d'explorer des configurations non visitées du pathosystème (c'est à dire des cas d'épidémies annuelles pour lesquelles Mildium n'avait pas été expérimenté). Ce type de jeu s'est avéré difficile à mettre en place faute d'expertise du cognitif pour construire les scénarios sur lesquels faire jouer les experts concepteurs. Les cas de figures non envisagés ont dès lors été imaginés avec les experts pendant la partie exploratoire des entretiens individuels.

On a procédé de la manière suivante : le modélisateur interrogeait un expert sur une configuration des variables de décision pour laquelle le système lui semblait mal défini. L'expert retranscrivait mentalement les conditions réelles qui pouvaient amener le **POD** dans cet état, et définissait la ou les sous-procédures à mettre en œuvre dans cette situation. Les experts ont procédé spontanément à cet exercice, leur connaissance du métier leur permettant d'identifier les cas de figure non définis de manière plus rapide que le modélisateur.

Cette approche souligne bien que mon travail se place à la fois dans le cadre du recueil de connaissances (un **POD** pré-existait à sa modélisation), mais également dans le cadre de l'aide à la conception. En effet le travail de recueil de connaissances a été l'occasion de concevoir des solutions à des cas de figures inédits.

Pour les itérations à venir du **POD** Mildium, le nombre de parties prenantes à la conception pourrait dépasser la dizaine d'experts-expérimentateurs. Le recours au jeu de rôle pourrait s'avérer une procédure intéressante, le second jeu de rôle servirait notamment pour faire émerger les meilleures idées.

4.5.3 Éléments de généralité de la méthode de recueil

Une unique expérimentation, avec de multiples experts, a été rapportée dans l'article, mais ce protocole de recueil de connaissances a également été utilisé dans le cadre du projet **ADD-Vin**, avec un seul expert, afin de modéliser les stratégies annuelles de protection phytosanitaire des quatre viticulteurs du réseau **ADD-Vin**. Un exemple de ces modèles est présenté en annexe D. Ils ont été recueillis non pas auprès des agriculteurs

eux-mêmes, mais auprès de P. Marandetⁱ qui était le truchement entre l'agriculteur et le modélisateur. En effet, la technique de recueil par Statechart étant restée étrangère à certains experts pathologistes, il nous semblait hasardeux de tenter l'expérience avec les viticulteurs.

Le recueil réalisé avec P. Marandet s'est avéré extrêmement rapide : là où seize entretiens avaient été nécessaires pour recueillir le **POD** Mildium, il n'en a fallu que trois pour recueillir chaque « modèle d'action viticulteur » et ce alors même que ces modèles prennent en compte les stratégies mildiou, oïdium, excoriose, pourriture grise et insectes (avec parfois une stratégie spécifique pour la flavescence dorée). Ces modèles n'ont toutefois qu'une valeur descriptive puisqu'ils n'ont pas fait l'objet d'une validation auprès des viticulteurs dont ils représentent la stratégie phytosanitaire.

Cette seconde expérience m'a permis de tester la validité de la méthode dans d'autres contextes décisionnels. On verra en conclusion (chap. 7) l'importance de cette genericité pour d'autres domaines d'application (génie des procédés alimentaire)

4.6 Conclusion du chapitre

La technique mise en œuvre a permis d'explicitier de manière exhaustive le **POD** Mildium, de le formaliser et a aidé les experts à préciser le comportement attendu pour les cas qu'ils n'avaient pas encore eu l'occasion d'expérimenter. Le chapitre suivant présente le résultat de ce recueil, à savoir le modèle du **POD** Mildium.

i. Élève ingénieur stagiaire de l'UMR Santé Végétale

Chapitre 5

Le POD Mildium

Contents

5.1	Introduction	125
5.2	Matériel et méthode	125
5.3	Présentation de l'article	125
5.4	GrapeMilDeWS (part.1) un POD pour la protection intégrée du vignoble contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne	126
5.4.1	Introduction	127
5.4.2	Theoretical introduction to Statechart formal modelling	129
5.4.2.1	The Choice of Discrete Event Systems	129
5.4.2.2	Finite state automaton	130
5.4.2.3	Statechart	131
5.4.2.4	The graphical syntax of the Statechart	131
5.4.3	Principles and hypothesis for the design of GrapeMilDeWS decision workflow	133
5.4.3.1	Crop protection design choices	133
5.4.3.2	Observations and information generation	134
5.4.3.3	Model's architecture	134
5.4.4	GrapeMilDeWS detailed presentation	136
5.4.4.1	GrapeMilDeWS Statechart's structure	136
5.4.4.2	Main process overview	136
5.4.4.3	Active period management	139
5.4.4.4	Stage 0	139
5.4.4.5	Stage 1	141
5.4.4.6	Stage 2	145
5.4.4.7	Stage 3	147
5.4.4.8	Stage 4	148
5.4.4.9	Stage 5	149
5.4.4.10	Stage 6	151
5.4.4.11	Downy mildew product choice	152
5.4.4.12	Powdery mildew product choice	153
5.4.5	Discussion	153
5.4.5.1	GrapeMilDeWS an IPM decision Workflow	153
5.4.5.2	Formal graphical modelling	154
5.4.6	Conclusion	155
5.5	Discussion du Chapitre	156
5.6	Conclusion du Chapitre	156

Au cours du chapitre précédent (chap. 4), on a présenté la méthode de recueil de connaissances élaborée au cours de cette thèse. Ce chapitre sera plus précisément dédié à la présentation du résultat de ce recueil, à savoir le modèle formel du **POD Mildium** sous sa forme graphique en Statechart. Comme dans le chapitre 4, le corps du texte prend la forme d'un article scientifique (« *Working paper* »^a) reproduit ici intégralement. Il faut souligner que certaines parties résument des éléments déjà présentés au cours des chapitres précédents.

5.1 Introduction

Citons les objectif de l'article qui suit : « L'objectif est de présenter le modèle de décision formalisé nommé **POD Mildium** et traduit par **GrapeMilDeWS** : Grapevine powdery and downy Mildews Decision Workflow System. Il s'agit de la présentation objectivée et exhaustive de cette conception **PIC** à base d'expertise. »

On a insisté dans les chapitres précédents sur l'intérêt de la formalisation pour communiquer. L'article ci-après met concrètement en pratique cette idée en soumettant l'intégralité du concept Mildium à la communauté **PIC**. Par cet exposé, on entend aussi illustrer les atouts des Statecharts, représentation graphique et sémantique formelle, pour modéliser des outils décisionnels en agriculture.

5.2 Matériel et méthode

L'article présente en section 5.4.2 les éléments théoriques nécessaires à la compréhension du modèle formel. Cette section est un condensé des développements du chapitre 2 section 2.3 et 2.6. Les principes de conception et l'architecture du modèle sont précisés en section 5.4.3.

5.3 Présentation de l'article

L'introduction de l'article replace ce travail dans son contexte (cf. chap. 1).

L'article présente dans une première partie le formalisme **SED** et la syntaxe des Statecharts, résumant ainsi la présentation faite au chapitre 2.

La seconde partie (section 5.4.3) expose les principes de conception de Mildium (vus au chapitre 3). Cette section introduit également les variables et les évènements avec lesquels les décisions sont prises. Elle se termine par la présentation de l'architecture du modèle : les échanges d'informations entre Mildium et l'environnement sont organisés selon trois niveaux de portée. Mildium au centre, puis le voisinage permettant la lecture et l'écriture des valeurs des variables décisionnelles, et enfin l'environnement n'échangeant avec Mildium que des ordres de traitement et des notifications d'exécution (voir fig. 5.4).

La troisième partie de l'article (section 5.4.4) précise le modèle en détail avec dans un premier temps, une vue générale du processus au cours de la saison, et dans un deuxième

a. décliné le 09/10/2008 par l'un des éditeurs d'*Agricultural Systems* comme hors du domaine de la revue, sans évaluation par des juges arbitres

temps le raisonnement développé au sein de chaque étape ainsi que l'explication des différents Statecharts afférents à cette étape.

La discussion (section 5.4.5) se divise en deux parties. La première replace la démarche de conception de Mildium dans le cadre de la PIC et de la modélisation de la décision en agriculture (voir chap. 3). La seconde présente quelques arguments en faveur de la modélisation formelle pour la protection des cultures, en évoquant quelques exemples d'utilisation de ces méthodes en biologie. Cette argumentation sera développée plus en détail au cours du chapitre 7.

5.4 GrapeMilDeWS (part.1) un POD pour la protection intégrée du vignoble contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne

“Working paper” décliné le 09/10/2008 par l’un des éditeurs d’*Agricultural Systems* comme hors du domaine de la revue, sans évaluation par des juges arbitres .

GrapeMilDeWS (part.1) an integrated pest management (IPM) Decision Process against grapevine powdery and downy mildews

Bertrand Léger^{§*} and Olivier Naud^{*} Véronique Bellon-Maurel^{*} Michel Clerjeau[•] Laurent Delière[§] Philippe Cartolaro[§] Lionel Delbac[§]

^{*}Cemagref - UMR ITAP - BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5

[§]INRA - UMR Santé Végétale -BP 81 33883 Villenave d’Ornon Cedex

[•]ENITA Bordeaux - 1, cours du Général de Gaulle CS 40201 33175 Gradignan Cedex

Abstract

GrapeMilDeWS is an expert based approach for the integrated pest management (IPM) of two of the major pathogens of grapevine (*Vitis vinifera*): *Erysiphe necator* causing powdery mildew and *Plasmopara viticola* causing downy mildew. **GrapeMilDeWS** has been designed and experimented by a team of phytopathologists. It is presented here as a formal model in Statechart. We argue that formal modelling under the Discrete Event System paradigm (DES) is efficient to model this kind of Decision Workflow Systems. The formalism is introduced and the **GrapeMilDeWS** system thoroughly described. Experimental results and model validation are given in a “part.2” article.

5.4.1 Introduction

Today, vine growing represent only 3% of the land use in France. Yet, it still accounts for 20% of the national pesticides consumption (Aubertot et al., 2005).

The need to develop alternative cropping system was diagnosed as early as the 1950’s. Since then, the concept of IPM evolved from these early works on integrated control. In his review Kogan (1998) counted 64 definitions of this concept. The FAO’s one (FAO-UNEP, 1974) is the following:

Integrated Pest Control is a pest management system that, in the context of the associated environment and the population dynamics of the pest species, utilizes all suitable techniques and methods in as compatible a manner as possible and maintains the pest population at levels below those causing economic injury.

On Grapevine, IPM against insects and mites is successfully implemented. In the case of fungal diseases, knowledge is still lacking or under construction. Recent work about biological control for downy and powdery mildews has been carried out using auxiliary mites (English-Loeb et al., 2007; Duso et al., 2005). Finding elicitors of the vine natural defences (Belhadj et al., 2006), or selecting resistant cultivars are other practical ways to develop IPM in vine.

Contribution to IPM on grapevine can also be made using the existing knowledge about the dynamics of the pathogens’ development, the periods of risk (Thind et al.,

2004), the known resistances against fungicides and the proper phytopharmaceutical product management (Matasci et al., 2008; Waard et al., 1993) as well as by technical expertise spanning from product choices that loosen the risks of resistance appearance to prophylactic measures, early symptoms sightings and "epidemics trend inference". This approach which proposes solutions to reduce the number of treatments, through observations, thresholds or risk models, can be illustrated by (Oliva et al., 1999; Hoffman et al., 2004).

Since 2001, The INRA santé végétale (plant health) laboratory has undertaken the design of pest management decision rules, based on observation and expertise, that come as close to IPM as can be. The target diseases were: gray mold (*Botrytis cinerea*), "insect" pests (*Scaphoideus titanus*, *Lobesia botrana*, *Empoasca vitis*, *Panonychus ulmi*), downy mildew (*Plasmopara viticola*) and powdery mildew (*Erysiphe necator*).

Up to now, the chosen scale of these decision rules has been the plot and the decision process for pesticide application is made individually for each pest. Although being a necessary step, this approach is not adapted to an IPM decision support system (DSS) at the farm level, where the growers is keen to have multiple diseases treated in a single application. The practice of coupling treatments is particularly widespread with powdery and downy mildew treatments. In France, these two diseases represent 80% of the treatments applied on grapevine (ASK, 2000).

The first part of the work presented here was therefore to move from a one-plot/one-pest approach to a more pragmatic approach that pairs treatments against a couple of diseases, i.e. powdery mildew and downy mildew. The aim is to be more compatible with common practices.

Our ultimate goal is to transfer an operational DSS that permits to significantly reduce the number of fungicides and yet guaranty that the production targets (both qualitative and quantitative) are reached.

However before designing a DSS, it was necessary to design, formalise and evaluate prescriptive crop protection decision strategies.

We abandon here the term "decision rule" in favour of the concept of *crop protection decision workflow system* (CPDeWS), which better accounts for the sequential and integrative structure of the crop protection decision system we developed. On the concept of workflow please refer to (van der Aalst and van Hee, 2002). Our work is grounded on the French agronomic tradition, which has developed the concept of "general model" since the late 1980's to account for the way farmers take their decisions and manage their farms. Traditionally, this qualitative framework is targeted for diagnosis and accounts for the fact that decisions modify both the production system through "technical itineraries" (Sebillotte, 1978) and the farmers representations through model for action (Sebillotte and Soler, 1988).

Indeed, we designed a decision system that organizes the collection of information, the decision making, and the treatment applications in time. We acknowledge that the tactical decision rules that may trigger a treatment action should be adapted during the season. Our CPDeWS models a process, beginning at bud break in spring up until harvest. The decisions are influenced by the decisions taken earlier, the phenological development of the plot and the evolution of the crop's sensitivity to each pathogen. Finite state automata (FSA) (Black, 2008), under the discrete event systems paradigm,

is a formalism that is well adapted to modelling our time/season dependant system. With FSA, the input situation of the pathosystem can explicitly be linked to the required decisions.

The originality of our model is that it emphasizes the sequentiality and temporality of the decisions. This approach differs from rule-based expert systems (ES), which do not focus on temporality (Travis and Latin, 1991; Shaffer and Brodahl, 1998). The hypothesis supported by (Girard and Hubert, 1999) is that emphasizing temporality forces the experts to give an exhaustive specification of their crop protection program.

The complexity of designing a multi-target with evolving priorities CPDeWS required a formal representation. This formal model should be both understandable by phytopathologists other than its designers and suited for computer simulations. Indeed computer simulation of crop protection seasons under climatic and epidemic scenarios, is thought to help design and test new cropping systems (Sebillote, 1987a). We chose the Statechart (Harel, 1987) formalism for creating this model.

The purpose of this paper is therefore to present the formalized decision model named GrapeMilDeWS, for grapevine protection against downy mildew and powdery mildew decision workflow system. It provides an exhaustive and explicit description of our expertise-based IPM design.

The first part of this paper consists in a description of the formalism used for the model. In the second part, the CPDeWS, named GrapeMilDeWS is presented in details. Extensive comments and explanations are made so as to allow understanding the contents of GrapeMilDeWS without *a priori* knowledge of the Statechart language. The assessment of the GrapeMilDeWS model decisions in comparison with the experiment ones and field agronomical performances is the subject of a second paper (Léger et al., 2008b).

5.4.2 Theoretical introduction to Statechart formal modelling

In this section, we introduce the formalism of Statechart and explain why it was chosen.

5.4.2.1 The Choice of Discrete Event Systems

The crop protection's decision system is modelled as a flow of decision leading to work operations. Our aim is to represent the temporal dimension of the CPDeWS, for the whole growing season. The continuous dynamics of phenology and of epidemics can be represented at the plot scale by differential equations. However, we have chosen to model the CPDeWS as a Discrete Event System (DES). Indeed the IPM experts take decisions based on thresholds defined on the epidemics and the phenological stage variables. The variables are therefore discretised according to the thresholds. The decisions are thus made according to these discrete values and the crossing of a given threshold constitutes an event. The combination of the epidemics and phenology variables compose a finite set of values for the input vector of the CPDeWS, together with a set of external events, such as rain forecast. Decisions, like "evaluate the diseases level" or "order a treatment" are output events of this system.

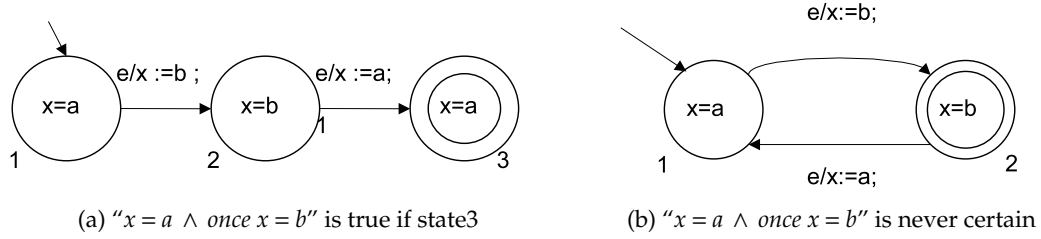


Figure 5.1: State diagram : used to check a system's property

Among DES formalisms, we chose the diagrammatic language of Statechart. As they are depicted by readable graphs, statecharts are relevant mediation tools between the phytopathologist designers and the knowledge-management researchers for eliciting the formal model (Léger and Naud, 2007). Computationally speaking, Statechart can be assimilated to FSA. The later are presented in the next section.

5.4.2.2 Finite state automaton

FSA are mathematically depicted by directed graphs where nodes are states (for instance, actions or observations in our case) and edges are transitions (Figure 5.1). Transitions are labelled with events. They may also bear a "guard condition". From the active state, a given transition can only be taken at the occurrence of the event specified by its label, if the guard, when present on the label, is evaluated to "true".

Consider now a system which holds track of the evolution of variable x . The "tracker" is modelled using a FSA. Here, labels mapping x 's values have been added to the states. The event label is attached to each change of variable x . While taking any transition labelled with " e ", the value of x is updated as stated by $/x := aNewValue$. The slash sign '/' indicates that an atomic action is carried out during the transition.

In Figure 5.1(a), state 3 is different from state 1 even though they both record the same property of the system: $x = a$. However, state 3 also holds the information that the system has been in state 2 at one point. This is where a modeller can choose the behaviour he needs to represent. If the monitoring of behaviour " $x = a$ and once $x = b$ has been true" is not relevant in the problem to solve, then the modeller can choose the simpler automaton in Figure 5.1(b).

Note that these two automata are not semantically equivalent: in Figure (a), the automaton can only accept one change of x from a to b , whereas the automaton represented in Figure (b) accepts an infinite number of changes.

We use FSA to monitor relevant phenomena during the crop protection season which we label and once they are identified, we act upon the system. For us the states are more than the combination of all input variables. They depict our output decision. At different time, similar input values may be repeated, but the state and the property associated to it will depend on the foregoing sequence of states that were reached. The combination of FSA with variable management and the possibility to label states so as to describe desired properties and generate actions accordingly, are called *State Diagrams* (Booth, 1967).

Yet, State Diagrams have a major draw back: the number of states becomes unmanageable. As soon as concurrent processes are modelled, the number of states is the

Cartesian product of each independent process's number of states. In our case, that combinatorial problem ("state explosion") occurs as soon as a rule in the model holds for the whole duration of the crop protection season. For example, monitoring the status of a product active period (AP)^b is relevant during the whole season, although it is not relevant to all decisions. Statechart offers solutions (hierarchy and concurrency) to avoid the combinatorial explosion.

5.4.2.3 Statechart

The next section introduces the Statechart formalism. First introduced by Harel (1987), Statechart differs from the standard finite state automata formalism, by its following properties: in Harel's words:

$$\text{Statechart} = \text{state-diagrams} + \text{depth} + \text{orthogonality} + \text{broadcast-communication}$$

- Statechart allows depth: a hierarchical view of the system, each state can be composed of a substatechart.
- Orthogonality or parallelism, enhances the semantics, permitting to describe concurrent processes on the same chart.
- Finally, Statechart features broadcast communications. In a broadcast communication system, an event is available to every concurrent process simultaneously.

After this short introduction, the syntax and some semantic elements are presented. For accessible yet more complete presentation of Statechart refer to (Harel, 1987; Harel and Kugler, 2004). With its integration as a part of the Unified Modelling Language (UML 2.0) (OMG, 2007), Statechart is now supporting object oriented design. Under the Object Oriented modelling paradigm, broadcast communication has been restricted. The popularity of Statechart led to the design of many flavours. Comprehensive comparisons are presented in (von der Beeck, 1994; Maggiolo-Schettini et al., 2003).

Our implementation of the model is done using the Rhapsody software by Telelogic (Harel and Gery, 1996).

5.4.2.4 The graphical syntax of the Statechart

Reading tip: the words in capital are key concepts which are explained later in the section.

States Harel introduces 4 kinds of states in Statechart (see Figure 5.2). The *simple states* 5.2(a) which are close equivalent to the FSA states ; the *final states* 5.2(b) are the acceptor states in FSA and represent the completion of a Statechart or its substatechart.

Hierarchy (i.e. substatechart) is made possible by: the "*OR state*" 5.2(c) which includes exclusive substates inside a parent "*OR state*" and the "*AND state*" 5.2(d) which allows concurrent processes to run simultaneously. The concurrent processes of the AND-State are graphically divided by dashed lines.

Entry and exit **ACTIONS** can be executed when the state activates or when it deactivates.

b. The active period is the period during which the product efficiency is "guaranteed", and after which we consider the plot has become susceptible again

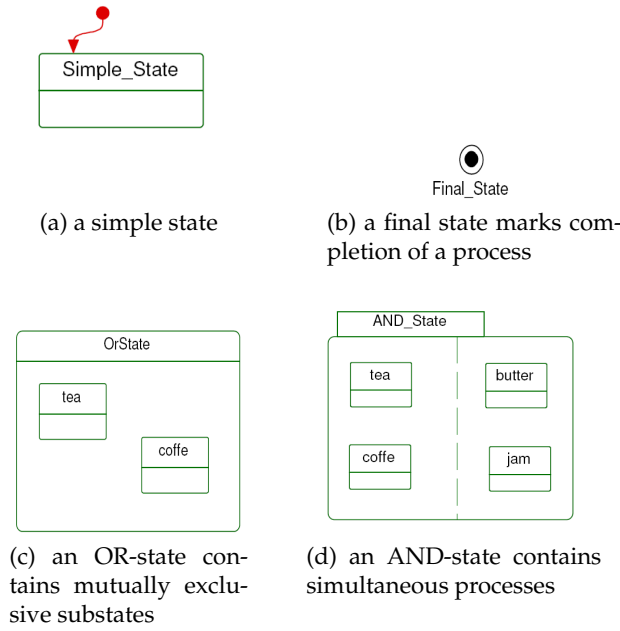


Figure 5.2: Statechart's different kind of states

Transitions connect a set of origin states to a set of destination states. **EVENTS**, **GUARDS** and **ACTIONS** compose the label of a transition. A transition label is structured as follow:

$$evAnEvent[aGuard]/anAction$$

GUARDS are denoted between brackets '[' *guard* '] and **ACTIONS** are preceded by the slash sign '/'. In GrapeMilDeWS, all events are identified with the prefix '*ev*'. A transition is potentialized if its origin states are active. It is triggered by the **EVENT** specified on its label and on condition the **GUARD** is "true". While the transition is taken, an **ACTION** may be executed.

Each component of the label is optional. A transition with no triggering event is called a nul transition and is taken "as soon" as its origin states becomes active^c, provided the guard is true. Usually, transitions are instantaneous (Maggiolo-Schettini et al., 2003).

Events are instantaneous messages originating from the Statechart or from external sources. The occurrence of an event triggers the transitions referencing the event on its label, provided the transition is potentialized.

Guards are boolean conditions that control if a potentialized transition can be taken.

Actions are pieces of algorithm that modify the internal values of the system, for example: event generation or variable assignment. Actions may be executed during a transition or upon entry or exit of a state.

Readers interested in the formal definition of the UML Statechart semantic (that we use) should refer to (Damm et al., 2003).

Pseudostates are graphical symbols that have no transcription in formal semantics. They are: the initial states (also known as default transitions), the condition nodes, the

c. This is Rhapsody object Statechart semantics, it requires the object which behaviour is described by the Statechart to have the focus. Focus while be given when a triggering event allows a transition to be taken from a stable configuration. Focus is lost when a stable configuration is reached, i.e. no more transitions can be taken)

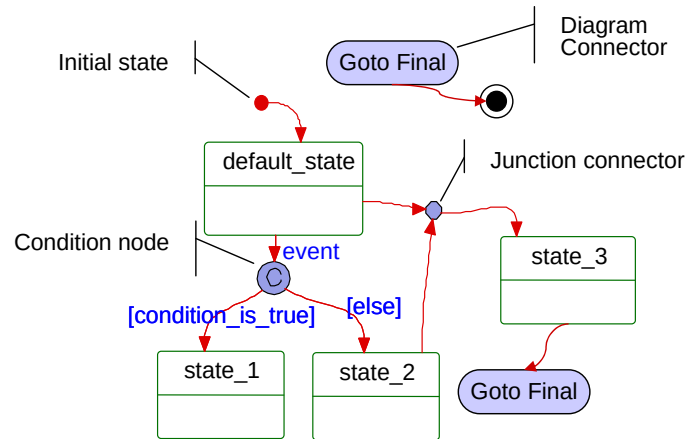


Figure 5.3: Pseudo-states (initial state, condition, junction and fork as well as “diagram connectors”) have no mathematical existence but are graphically useful.

fork and junction (example in Figure 5.3). The diagram connectors are not part of the original Statechart syntax, but come handy to jump from one side of the diagram to the other. They help avoid cluttering the Statechart.

5.4.3 Principles and hypothesis for the design of GrapeMilDeWS decision workflow

Having established why the system at hand is modelled as a DES and having introduced the formalism, we present the crop protection principles of GrapeMilDeWS and then how the formal model was designed.

5.4.3.1 Crop protection design choices

GrapeMilDeWS aims at avoiding yield losses, not at avoiding disease symptoms. This is achieved (i) by controlling low epidemics (i.e. maintaining it at a low level) with a reduced number of systematic treatments applied at key phenological stages (2 mandatory treatments against downy mildew and 2 against powdery mildew), and (ii) by identifying the severe epidemics as early as possible, in order to apply additional treatments (5 optional sprayings are available against downy mildew and 3 extra treatments may be done against powdery mildew).

Adapting the number and the timing of the fungicides application to the plots' specific epidemic conditions is achieved through intensive use of various data sources, mostly from the plot itself.

When a treatment is required for a disease, the other will be dealt during the same application unless the risk in the plot (or in the area) is judged nil or low. This rule allows us to couple the treatment against powdery and downy mildews as often as possible. This heuristic simplifies the management of treatments against multiple pathogens which otherwise would impose strong operational constraints on the grower.

Still to alleviate the work load, GrapeMilDeWS is constrained w.r.t. the number of disease level evaluations in the plot. All plot observations lead to one or more treatment decision. Three field observations are done before flowering (one of them is optional), a third mandatory observation is done a month after flowering.

In a pragmatic approach, no treatment reduction is attempted during the period of highest susceptibility, the crop is systematically protected at the flowering and there is no need to estimate the level of infestation.

5.4.3.2 Observations and information generation

The treatment decisions are mostly made based on epidemic estimates, at the plot scale. These estimates are interpreted from sampled observations on the leaves as well as the bunches. The observation results are then translated into the three following discrete variables:

- O standing for the level of powdery mildew on the leaves (O for Oïdium: powdery mildew in French)
- Og standing for powdery mildew on the bunches (Og for Oïdium grappes: bunches powdery mildew)
- M for downy mildew on the leaves (M for Mildiou: downy mildew)

The number of modalities varies from 2 to 3 levels depending on the disease, and the observation date. These modalities encode the qualitative expert assessment as follows: ('0') for absence or low epidemic; ('+') for moderate to high epidemic; and ('++') for very high epidemic risk. The threshold values between these different modalities evolve with the phenology of the vine. This allows to adjust the consequences of an epidemic level to the evolution of the plant susceptibility during its development.

Field observations are the only information used as far as powdery mildew treatment decision is concerned. Two extra indicators are used for the decision making with respect to downy mildew epidemics:

- The local area risk level (ILM) gives information on the disease development risks at a geographical scale larger than the plot. It is based on a large disease monitoring network and on a climatic risk model. ILM is interpreted from the plant protection service advisory bulletins^d(SRPV-Aquitaine, 2007). It is encoded as a discrete variable, with two modalities: ('0') low risk and ('+') medium to high risk.
- The forecasted rain events from the MeteoFrance weather forecast service.

The variables (M, O and ILM) are built with thresholds which are modified during the season^d. This has the effect of embedding some expertise on the dynamics and the dangerousness of the epidemics, into the three estimators. This provides GrapeMilDeWS and the end user, with data which are more easily interpreted.

5.4.3.3 Model's architecture

To fully understand how the system works and especially how information is managed, it is necessary to carefully describe the interactions of GrapeMilDeWS with the vineyard and the data flows between them. As shown on Figure 5.4, information generation and exchange can be organized in three scopes according to the information access rights.

The first scope is the environment of the decision system. Concretely, the environment is the vineyard plot with its phenology, its epidemics, as well as the weather forecasts and the local area epidemic pressure around the vineyard. The communication between GrapeMilDeWS and its environment are limited to exchanging event messages.

d. see implementation details in GrapeMilDeWS part.2 (Léger et al., 2008b)

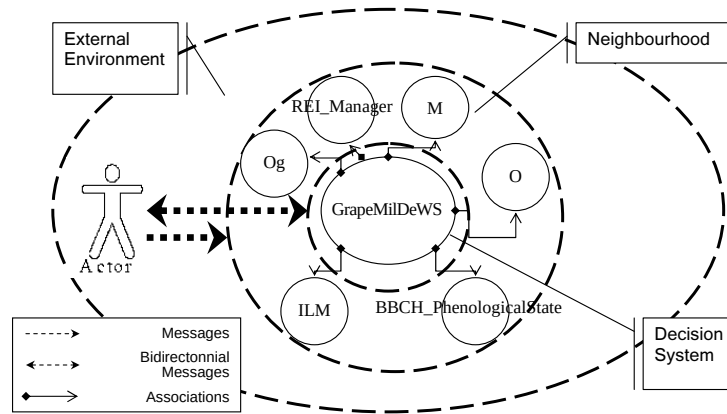


Figure 5.4: 3 Scopes are defines : the system, the neighbourhood, the environment

As events are not persistent information, a part of the communications are routed to the neighbourhood variables to make it perennial, the rest is interpreted directly by GrapeMilDeWS.

The second scope called the neighbourhood, is composed of the three field observations aggregated variables: O, Og and M (presented section 5.4.3.2 monitoring powdery and downy mildew epidemics, as well as the local downy mildew information (ILM), the phenological stage and the restricted entry interval manager^e(REI_Manager). They are modelled as associated objects to the GrapeMilDeWS system.

These five objects are GrapeMilDeWS' memory of the environment's status. They can exchange events with GrapeMilDeWS. For instance, the object "Pheno" which keeps track of the phenological state monitoring, sends a notification event each time the external environment (i.e. the actor in the first scope) updates its value. GrapeMilDeWS can also read the current state values of these variables whenever needed. The model is designed using the object oriented approach which has the advantage of built-in modularity. However the neighbourhood variable could be managed otherwise.

The third scope is the GrapeMilDeWS Statechart itself, inside of which the system's control over the data is total.

data flow The communications between the GrapeMilDeWS and the external environment is constrained by the boundaries of the different scopes. The environment is not directly observable. It is required that some actors run processes in that environment, which produce messages between the environment's continuous behaviour and GrapeMilDeWS. The main actor in the environment is actually the vine grower running GrapeMilDeWS. The processes are either permanent monitoring processes (phenology, weather forecast and local downy mildew risk) emitting status update information, or reactions to queries from GrapeMilDeWS (observation requests, treatment orders).

This architecture permits to build an asynchronous system that models well the reality of decision making in crop protection.

e. Restricted entry intervals (REI) are required by the French legislation on pesticides: depending on toxicity, access is forbidden from 1 to 3 days after an application.

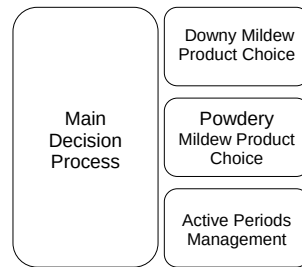


Figure 5.5: Four concurrent (simultaneous) functions compose **GrapeMilDeWS**

5.4.4 **GrapeMilDeWS detailed presentation**

5.4.4.1 GrapeMilDeWS Statechart's structure

GrapeMilDeWS is composed of four independent functional processes which run simultaneously (see Figure 5.5). Implemented in Statechart, these four functions are modelled as high level AND-States (see Figure 5.6). Along with the main process (section 5.4.4.2), are two product choice rules, one for each target disease (sections 5.4.4.11 and 5.4.4.12). The remaining AND-State is used to manage the active periods (AP) of the last treatment against each disease (section 5.4.4.3).

In the following, we start with the top level view of the main process. It represents the general organisation of the sequence of tactical decisions and the constraints controlling their timing. Then we will clarify the AP management key concepts. These preliminary given we will be able to detail the seven treatment decision stages. Finally we conclude with the two phytosanitary product selection rules.

5.4.4.2 Main process overview

GrapeMilDeWS' top level Statechart in Figure 5.6, abstracts from the details of the decision making which are hidden in the stages' substatecharts.

In the main process, each of the seven treatment decision stage state contains the intrinsic logic for a potential treatment against powdery mildew, downy mildew, or both, in the form of a substatechart (sections 5.4.4.4 to 5.4.4.10). In the following sections, we will refer to "treatment decision stage states" as "treatment stages" or just "stages". We will often use the following notation "Tx" when referring to a treatment ordered at Stage_x (i.e. from "T0" at Stage_0 to "T6" at Stage_6). When referring to the treatment target is necessary, the variable name may also be added. For instance "T1O" stands for the treatment targeting powdery mildew (the O variable) at Stage_1.

At three key periods of the crop protection, treatment stages are interlaced with observation states. The strategy is built around securing the flowering period. Three treatment stages are positioned before flowering to control the early epidemics on the leaves as well as on the inflorescences and three post flowering treatment stages control the development of the diseases on the bunches and leaves.

The season starts with a monitoring as the first leaves unfold ([BBCH>10] tag ① in Figure 5.6). References to phenological stages in the diagram are given in the BBCH

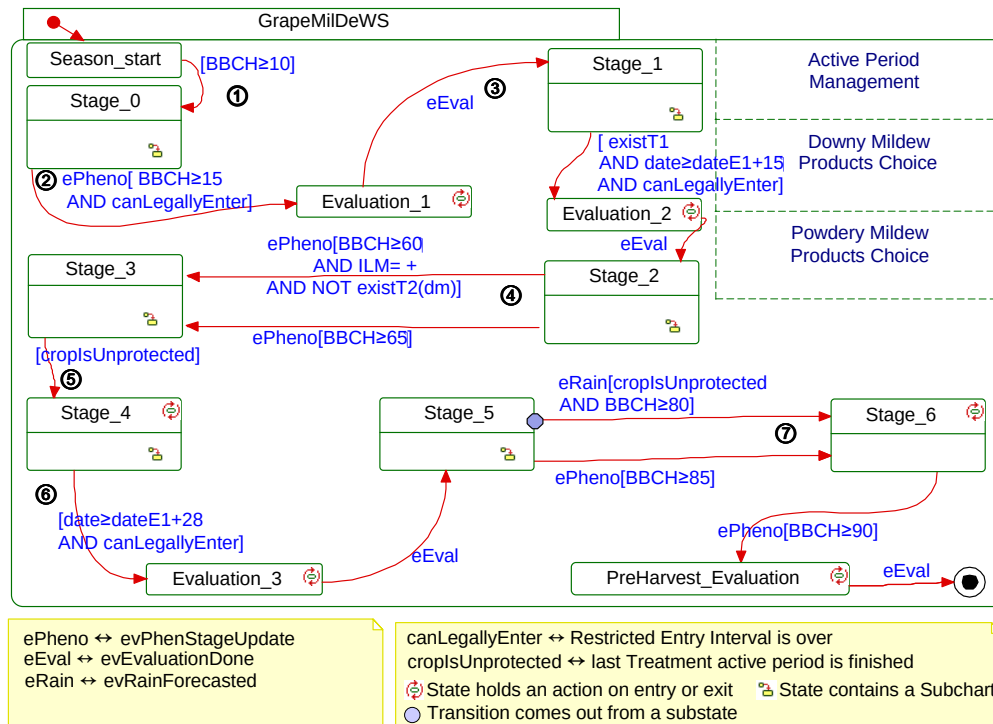


Figure 5.6: GrapeMilDeWS main process: 7 treatment decision stages and 3 observation states.

scale (Lorenz et al., 1995). The system remains in Stage_0 (details in 5.4.4.4) until the phenology of the plot has developed to at least 5 leaves unfolded (② Figure 5.6). Downy mildew treatment is optional at that stage. Stage_0's early monitoring is designed to control the extremely precocious downy mildew epidemic. If a treatment occurs during Stage_0, it is legally required that the restricted entry interval (REI) be elapsed before anyone enters the plot to perform the evaluation requested in GrapeMilDeWS' state Evaluation_1 (the plants must also have developed 5 leaves). The REI test has been encapsulated in the boolean function *canLegallyEnter* shown at ② Figure 5.6.

GrapeMilDeWS will remain in Evaluation_1 until the observation of the plot has been carried out and notified (evEvaluationDone) and the neighbourhood variables O and M (assessing both foliar epidemic levels) have been updated. (③ Figure 5.6) After that, Stage_1 is entered.

Stage_1 lasts two weeks after Evaluation_1 during which carrying out a powdery mildew treatment is required. An optional downy mildew treatment may also be decided according to the epidemic estimators (M and ILM). The temporal positioning of the treatments during Stage_1 is detailed in section 5.4.4.5. Stage_1, is aimed to last from '5/7' unfolded leaves to '8/10' leaves. Phenology being quite difficult to determine precisely, the designers have chosen to used a fixed time period of 15 days instead. They consider 15 days to roughly correspond to such a phenological development in the Bordeaux area where GrapeMilDeWS was experimented (see part.2 (Léger et al., 2008b)). At the end of Stage_1 the second evaluation is ordered, provided the plot can be safely entered (i.e. the REI resulting from the first downy mildew application has elapsed).

Evaluation_2 targets the same organs as Evaluation_1 did. Upon completion of

these observations, Stage_2 has information on whether the first stage has efficiently managed to controlled the beginning of each epidemic or, if new symptoms are still surging. If the epidemic level of any the two diseases is worrying, Stage_2 calls for an extra treatment in order to safely reach mid flowering. The precise decision logic of the transitions from Stage_2 to Stage_3 is quite complex and in-depth details are given in section 5.4.4.6. In our Bordeaux conditions the typical duration of Stage_2 is again approximately two weeks.

The objectives of the two early observations at Evaluation_1 (“E1”) and at Evaluation_2 (“E2”) are to detect the severe epidemics by quantifying the early symptoms of the diseases on the foliage, before the period of high susceptibility of the bunches. This early detection mechanism allows us, when required, to apply treatments limiting the proliferation of the inoculum on the foliage thus “breaking” the epidemics before it reaches the explosive phase (under the Vanderplanck theory Segarra et al., 2001).

Stage_3 (④ Figure 5.6) (see section 5.4.4.7) can be entered either at early flowering or at mid flowering. Depending on the decisions taken during Stage_2 (if no treatment against downy mildew was ordered at Stage_2 (T2M) the third treatment (T3) is done early, otherwise the plot is protected until mid flowering thus Stage_3 is entered at the end of T2’s AP). Stage_3 simply triggers the third treatment: T3. This is *the key mandatory treatment* in the GrapeMilDeWS program. It targets both powdery and downy mildews.

Stage_3 (⑤ Figure 5.6) ends when the shortest active period (AP) of the 2 product used for “T3”, has elapsed (i.e. on Figure 5.6, the function *cropIsUnprotected* becomes true). At that time, the berries are at pea size. There is no evaluation of the epidemics in the field between Stage_3’s exit and Stage_4’s entrance.

No mandatory treatment is required at that stage. Any spraying that may be ordered in Stage_4 is based on the values of O and M recorded during the first two evaluations (details in section 5.4.4.8). Stage_4 is designed to give extra security only in the cases of high epidemic pressure, these disease scenarios are detected during “E1” and “E2”.

Evaluation_3 (⑥ Figure 5.6) is ordered 28 days after “T3”, provided REI has elapsed after the optional “T4”. Evaluation_3 differs from the two previous evaluations. It monitors powdery mildew on the bunches and downy mildew on the leaves. It provides an early estimate of the sanitary status of the grape (before harvest) and support to decide on the opportunity for one more optional treatment.

At this time in the season, the bunches are beginning to close. The sprayings that may be ordered during Stage_5 are based solely on the indication acquired during Evaluation_3 (see section 5.4.4.9).

Stage_6 (⑦ Figure 5.6) consists in a final mandatory treatment against downy mildew, positioned during the first half of ripening (see section 5.4.4.10). The bunches are no longer susceptible to neither powdery nor downy mildews, but the aging leaves can be destroyed by downy mildew. Therefore T6 is applied to ensure the stocks have enough foliage for the maturation of the grapes. When the grape is ripe, a Pre-harvest_evaluation is ordered to control the overall quality of the crop protection. This assessment leads to no spraying decisions and may be discarded in a production context.

5.4.4.3 Active period management

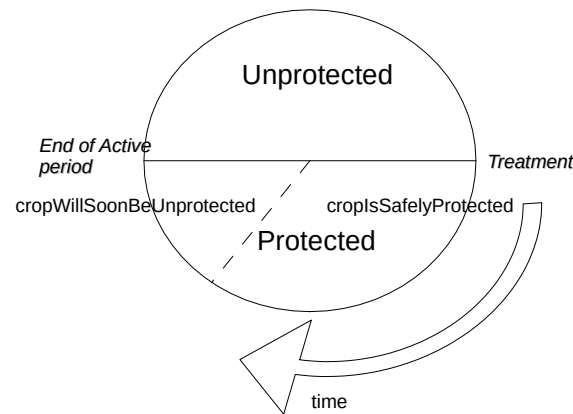


Figure 5.7: GrapeMilDeWS active period management is summarised by 4 States

The active period management consists of two symmetrical concurrent processes, used to keep track of the AP, one for each disease. As these statecharts are purely technical, they are not shown here, we rather provide a conceptual view of the AP management mechanism as shown in Figure 5.7.

When selecting a product, the active period duration is set. Once the treatment is done, A timer will keep the AP manager in the “Protected” state for the duration of the selected product’s AP (Figure 5.7). The “Protected” state has 2 substates : “crop is safely protected” and “crop will soon be unprotected”. Indeed the protection is considered safe until the delay before the end of the AP is less than `EARLY_RENEWAL_INTERVAL` (an expert parameter, we modelled as a constant value). Indeed, when the epidemic risks are high, the plant protection service often recommends to renew treatments a few days before the end of the active period. Typically the AP may be shortened by 2 to 3 days. After the end of the AP, the “Unprotected” state is activated. With these 4 States and the variable for the AP duration, we can model the protection provided by the treatment and ameliorate the positioning of the applications.

The active period protection can be queried using a set of boolean functions that map the set inclusions shown in Figure 5.7. Parameter *dm* allows to test only downy mildew protection, *pm* does the same for powdery mildew and no parameter tests both at the same time.

Following this overview of the crop protection process, the internal logics and sequentiality of each of the seven stages is described.

5.4.4.4 Stage 0

The substatechart of Stage_0 is shown in Figure 5.8. All tags in the following section refer to Figure 5.8.

This early monitoring stage starts as soon as the first leaves unfolded (`BBCH>10`). During Stage_0, the driving neighbourhood variable is ILM. It is updated each time the risk of downy mildew in the area changes. Early in the season up to flowering, ILM will

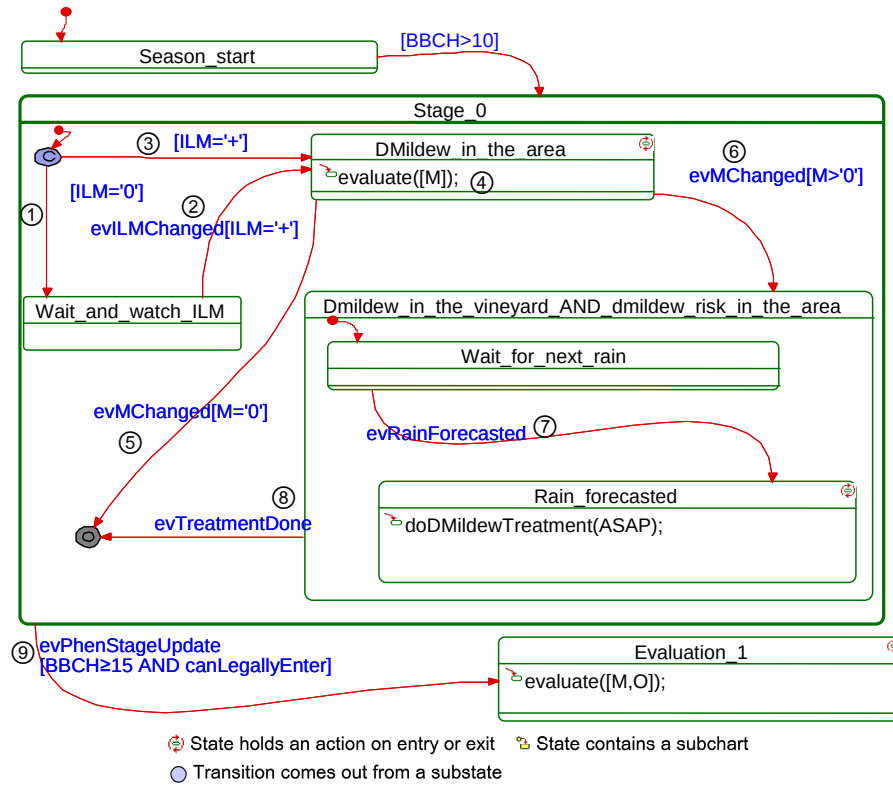


Figure 5.8: GrapeMilDeWS Stage_0

be set to '+' as soon as the first symptoms of downy mildew are found nearby the plot. This information is taken from the plant protection service advisory bulletins within the range of 10 to 25 km around the vineyard.

① If $[ILM='0']$ when `Stage_0` is entered, the `Wait_and_watch_ILM` substate is activated. It will remain so as long as ILM does not change. ② When ILM changes to '+', the transition towards `DMildew_in_the_area` is taken.

State `DMildew_in_the_area` can be activated when ILM is updated or if its value is '+' when `Stage_0` is entered ③. Entry in state `DMildew_in_the_area` generates an order to evaluate downy mildew in the plot (④ `evaluate([M])`). Completing that evaluation will update the M variable. If no downy mildew is found, the final state is reached ⑤ and no further action is taken within `Stage_0`. Otherwise `DMildew_in_the_vineyard_AND_dmildew_risk_in_the_area` (for short: `S0.DVDRA`) is activated ⑥.

The Substates composing `S0.DVDRA`, represent the behaviour that is generally applied for downy mildew management in GrapeMilDeWS. (i) First, the weather forecast watch is ordered upon entry into the `Wait_for_next_rain` state. (ii) Then, ⑦ when a rain is forecasted, the transition is taken, state `Rain_forecasted` is activated and treatment "T0" is ordered. Once the treatment has been done, the information is returned to GrapeMilDeWS with the event `evTreatmentDone` which triggers the transition between `Rain_forecasted` and the `Stage_0`'s final state ⑧. The final state indicates that no further activity will be carried out by the system while it remains in `Stage_0`.

When the field has 5 leaves unfolded, the phenological stage monitoring variable is updated. The update is notified to GrapeMilDeWS through the `evPhenStageUpdate`

event. That event sets Stage_0 to inactive, whatever its active inner substate ⑨ . However, the outgoing transition cannot be fired solely by the update event: the guard is composed of two mandatory conditions: 5 leaves must have unfolded ($[BBCH \geq 15]$) and the plot can be entered (*canLegallyEnter*) (i.e. the REI must have elapsed). Entry in Evaluation_1, generates the order for a field evaluation on the leaves of both powdery and downy mildew symptoms level.

5.4.4.5 Stage 1

The substatechart of Stage_1 is shown in Figure 5.9. All tags in the following section will refer to Figure 5.9.

Once the first mandatory observation of powdery and downy mildew in the field has been carried out, Evaluation_1 is exited and Stage_1 entered. The variables M and O are then up to date. Entering stage_1, (O, M and ILM) are used to select a state in the decision path according to the sanitary status of the plot. A mandatory treatment against powdery mildew is done within each possible path. It aims at breaking the dynamics of the epidemic very early in the season. This mandatory treatment may be positioned differently within the 15 day period of Stage_1, based on the results of the observations made during Evaluation_1. An optional downy mildew treatment may be added when required by the epidemic conditions.

The initial state (default transition) of Stage_1 leads to a first conditional node. This node has two branches separating the modalities of the powdery mildew variable O with the labels $[O = '++']$ and $[O < '++']$. We will structure the detailed presentation of Stage_1 along this first conditional node as Stage_1's decision making is driven by powdery mildew.

O < '++', low powdery mildew: The position of the spraying will then be driven by downy mildew through the second decision node ① . It, has 3 branches, one for each modality of the M variable.

If $M = '++'$, The high level of downy mildew requires immediate action. Therefore on entry of state *High_dmildew_in_the_vineyard*, mixed treatment of both powdery and downy mildews is ordered as soon as possible. Although powdery mildew is low, it is treated immediately so that only one spraying is done which makes the work easier to organise and is probably better for the operator's health and the environment.

High_dmildew_in_the_vineyard remains active until notification of the treatment (*evTreatmentDone*) triggers the outgoing transition to the final state.

If no downy mildew was found ($M = '0'$) then it is ILM which drives the decision. If no symptom has yet been found in the region (i.e. $ILM = '0'$), *Wait_and_watch_ILM* is activated. As in Stage_0, the monitoring of ILM continues until either, (i) the 15 day period of Stage_1 will *soon* be elapsed (transition labelled $[soon(DateE1 + 15)]$ ②^f); or (ii) the ILM value changes. If ILM is set to $ILM = '+'$ then *Dmildew_risk_in_the_area_OR_dmildew_in_the_vineyard* (for short: *S1.DRADV*) is entered. This state is the start of a weather watch procedure very similar to the one in Stage_0 (section 5.4.4.4). Details of the substatechart of *S1.DRADV* are given in Figure 5.10(a). If rain is forecasted, the

f. In our simulator implementation of GrapeMilDeWS, the *soon(adate)* function returns a date 3 days earlier than *adate*.

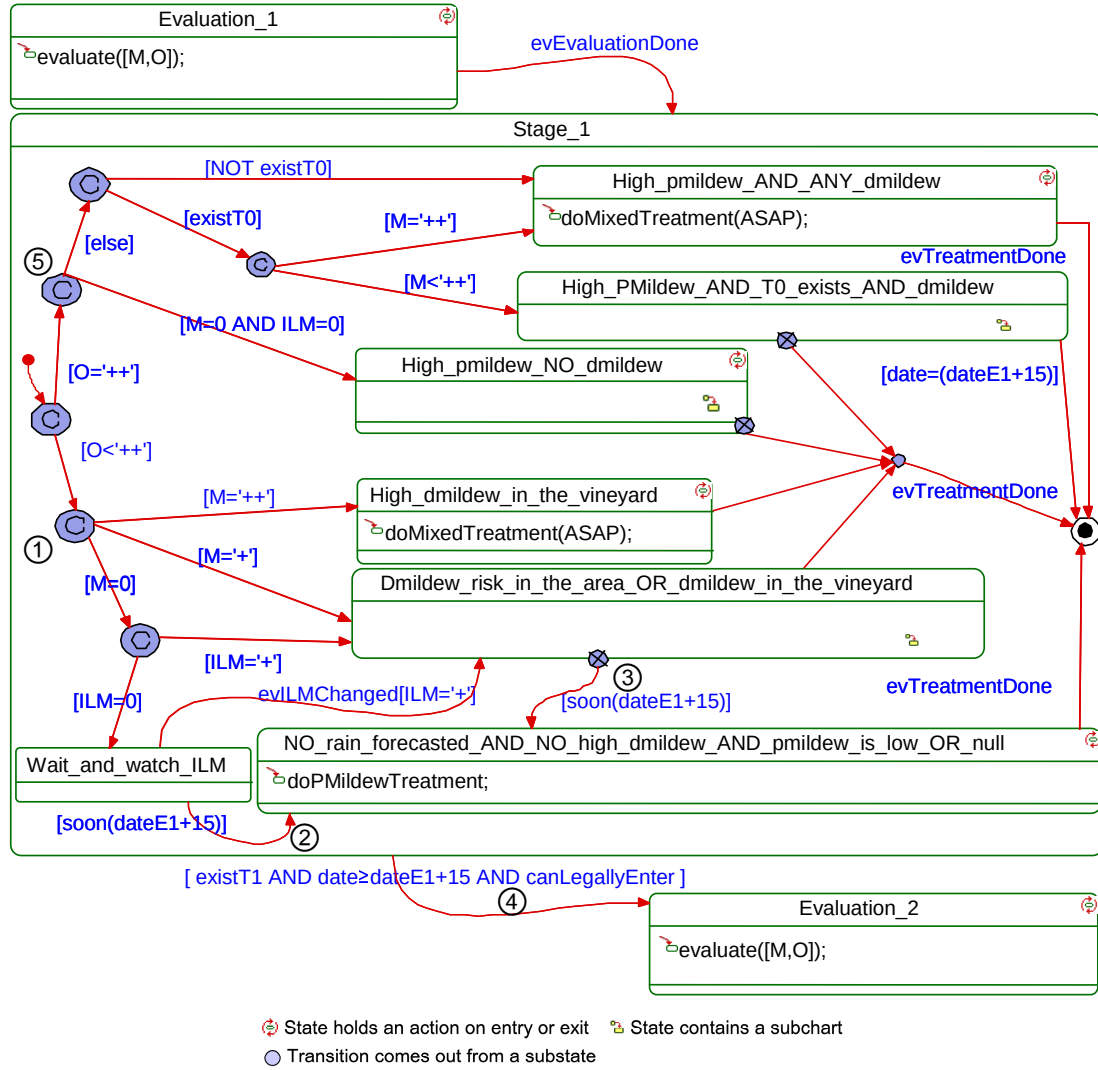


Figure 5.9: GrapeMilDeWS Stage_1

notification that the mixed application has been done triggers the transition to Stage_1's final state(see Figure 5.9).

Alternatively (see ③ Figure 5.9), if no rain is forecasted and if the 15 day period is almost finished, then the transition leading to `NO_rain_forecasted_AND_NO_high_dmildew_AND_pmildew_is_low_OR_null` (for short: `S1.NONOPLON`) will be taken (Note the crossed circle near ③). It is a “drill-through” symbol showing that the origin of the transition is a substate. On the substatechart Figure 5.10(a), the same symbol indicates that the transition, which originates from state `Wait_for_next_rain`, targets an external state. Therefore, looking at Figure 5.9 ③ , when the guard condition (`[soon(dateE1 + 15)]`) becomes true, the “drill-through” symbol indicates that the substate `Wait_for_next_rain` has to be active for the transition to be taken. That is because when the other substate is active, a mixed treatment is already pending, there is no need to double the order. When all conditions are fulfilled `S1.NONOPLON` becomes active and powdery mildew treatment is ordered (no event is required to trigger it. Here, the transition is purely conditional). The final state is reached after reception of the `evTreatmentDone`

event.

Going back to Stage_1's default transition, left of Figure 5.9, we shall now focus on the management of high powdery mildew infestation observed at "E1".

[$O = '++'$], *powdery mildew is high*: As Stage_1 targets specifically the early epidemic of powdery mildew, if powdery mildew level is already high at Evaluation_1, then a treatment should be performed as soon as possible.

The conditional nodes are structured as follows along the high powdery mildew branch. The second node ⑤ tests for absence of downy mildew in the plot as well as in the region.

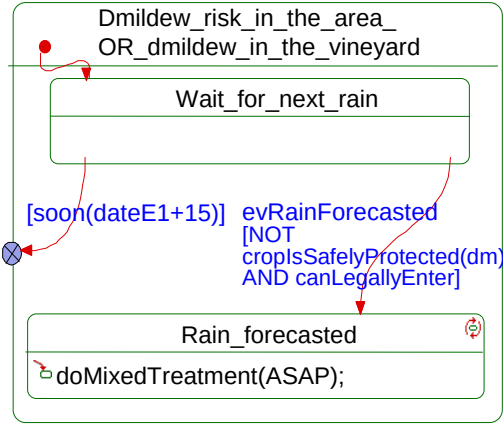
[$M = '0'$ and $ILM = '0'$]=true: An application solely against powdery mildew is required as soon as possible. State High_pmildew_NO_dmildew is activated ⑤. The behaviour of its substatechart is presented on Figure 5.10(b). The ordered sequence of action is (i) order a powdery mildew treatment a.s.a.p (state Pmildew_treatment_ASAP); (ii) wait for a change of ILM (Wait_watch_ILM). (iii) If the ILM value changes to '+', Wait_for_next_rain will be entered and monitoring of the rain forecasts will be initiated. Finally when a rain is forecasted, a downy mildew treatment will be ordered (evRainForecasted[canLegallyEnter]). However, if ILM remains at '0' or no rain is forecasted the process will be stopped when Stage_1 is exited.

The philosophy behind the High_pmildew_NO_dmildew substatechart (see Figure 5.10(b)) is (i) to execute the mandatory powdery mildew treatment a.s.a.p to control an epidemic that was estimated as '++' during the first evaluation; (ii) then to monitor the risk of downy mildew in the surrounding through ILM; (iii) if the risk increases then monitoring of the contaminating event is activated. This mechanism allows to disjoin powdery mildew and downy mildew treatments, allowing to spare downy mildew treatments when no epidemics was witnessed during the Evaluation_1, but also permitting to react when the epidemics of downy mildew is detected past the field evaluation.

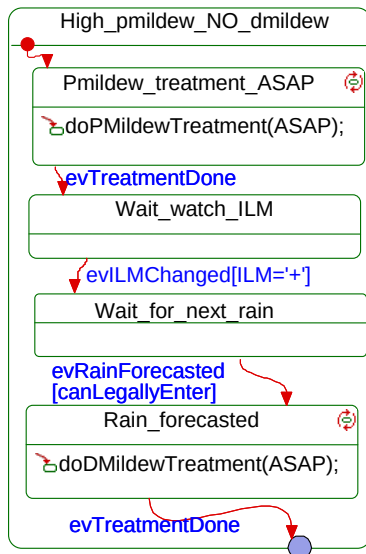
[$M = '0'$ and $ILM = '0'$]=false On the upper branch (noted [else]), downy mildew is either found in the plot or in the region.

The third node discriminates between existence and absence of a "T0" treatment. In practice, this optional treatment should be extremely rare. In the more general case: no previous treatment against downy mildew was done at Stage_0, a mixed treatment is ordered to be carried out as soon as possible, upon entering state High_pmildew_AND_ANY_dmildew. Indeed neither powdery nor downy mildew levels are negligible.

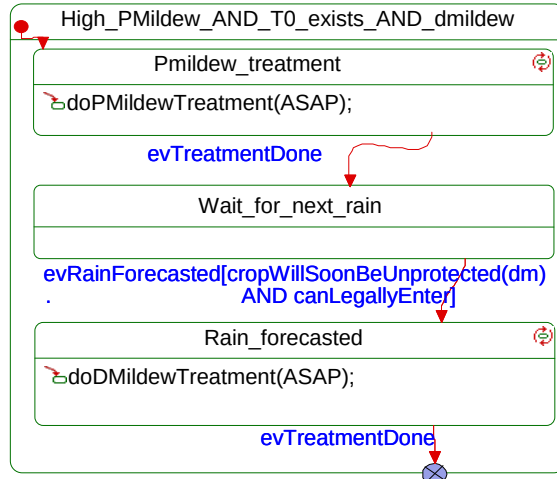
In the rare occurrence of "T0" (labelled [existT0]), we distinguish two behaviours. Either the downy mildew epidemic was not controlled by the previous treatment and $M = '++'$ was observed at "E1", in which case the situation is critical and immediate action is required for both diseases (state High_pmildew_AND_ANY_dmildew is entered). Or, on the contrary, "T0" has been efficient and the epidemic seems well controlled. In that case, state High_PMildew_AND_T0_exists_AND_dmildew (S1.HPT0ED for short) is entered. It may seem inconsistent that moderate downy mildew ($M = '+'$) leads to two different decision state. However the existence of "T0" imposes to take into account the remaining AP of that treatment. It permits to postpone the downy mildew application and eventually spare it if the weather is dry.



(a) Dmildew_risk_in_the_area_OR_dmildew_in_the_vineyard substatechart



(b) High_pmildew_NO_dmildew substatechart



(c) High_PMildew_AND_T0_exists_AND_dmildew substatechart

State holds an action on entry or exit Transition comes out from a substate

Figure 5.10: Substatecharts from Stage_1

The substatechart of S1.HPT0ED (Figure 5.10(c)) shows the following decisions: (i) to treat powdery mildew as soon as possible, then (ii) to enter the weather watch and (iii) spray before it rains if the AP of “T0” is near its end ($[cropWillSoonBeUnprotected(dm) \text{ AND } canLegallyEnter]$). S1.HPT0ED is exited when downy treatment is notified or when Stage_1 period is finished.

Concluding with presentation of Stage_1 (④ Figure 5.9), the transition going from Stage_1 to Evaluation_2 is guarded with the following condition: $[existT1 \text{ AND } date \geq dateE1 + 15 \text{ AND } canLegallyEnter]$, which guaranties before proceeding to the second evaluation that “T1” has been sprayed, that 15 days at least have elapsed since the previous evaluation and that the plot can be entered. The reason to test “T1’s” existence is that GrapeMilDeWS has no other way of ensuring that the treatment orders have been carried out before the other conditions become true.

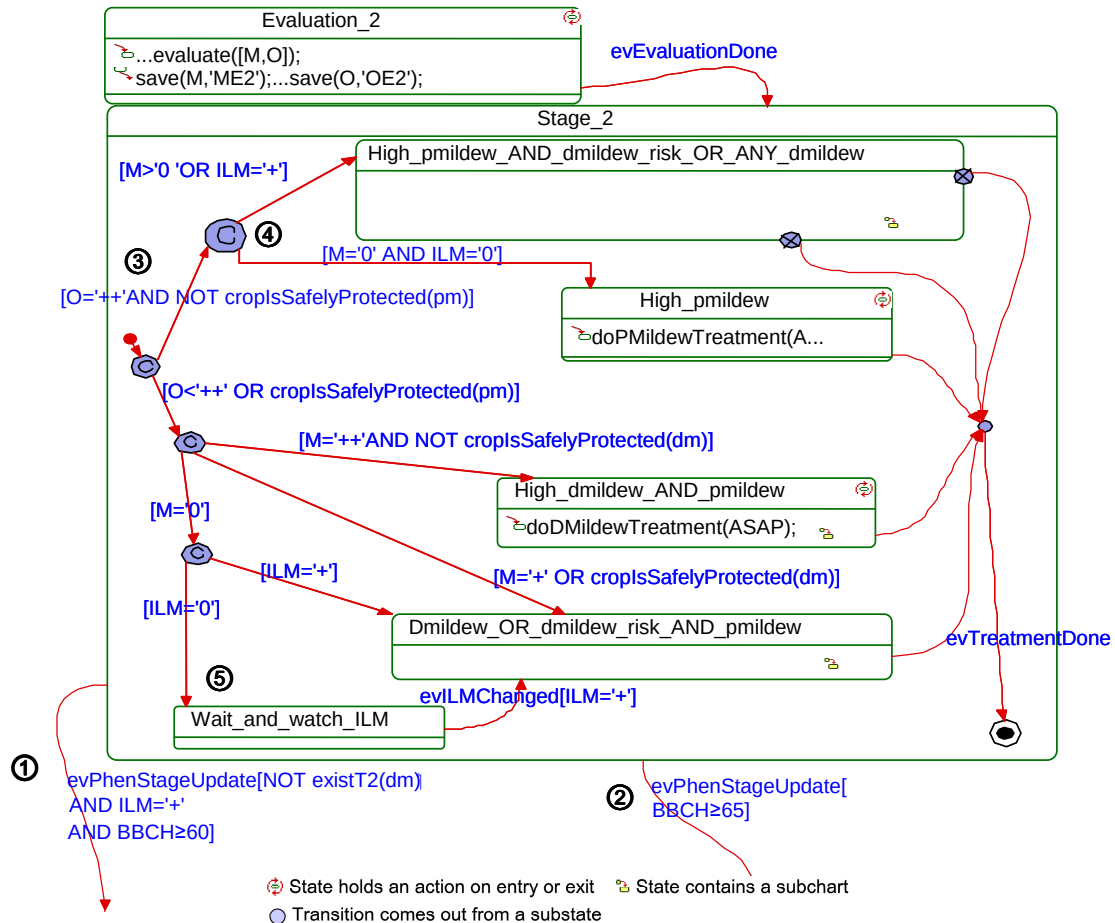


Figure 5.11: GrapeMilDeWS Stage_2

5.4.4.6 Stage 2

The substatechart of Stage_2 is shown in Figure 5.11. All tags in the following section will refer to Figure 5.11. In the two previous sections, we have been extremely explicit with the Statechart notation. From hereon, we will explain the concepts in a more straightforward manner, the details are to find on the figure.

Stage_2 is designed to schedule an optional treatment for either powdery or downy mildew or both. The decision is based on the level and evolution of both foliar epidemics observed during the second evaluation. “E2” allows a second assessment of the level of both epidemics, 15 days after “E1”. All treatments are optional at Stage_2 and may be spared if both epidemics are lulled.

Renewing the treatment is not systematic. It requires both the end of “T1’s” AP and high epidemic risks (assessed by O, M at “E2” as well as the current ILM and rain forecasts). Under low downy mildew epidemic pressure, the decision would be to withhold the second treatment up to the beginning of the flowering. In which case, the third treatment “T3” would be done a little earlier than what we consider normal (i.e. mid flowering)^① and that would permit to spare “T2”. Otherwise, when “T2” is actually needed against downy mildew or against both diseases, thanks to the protection provided by “T2”, Stage_3’s entry will be postponed until mid flowering ^②.

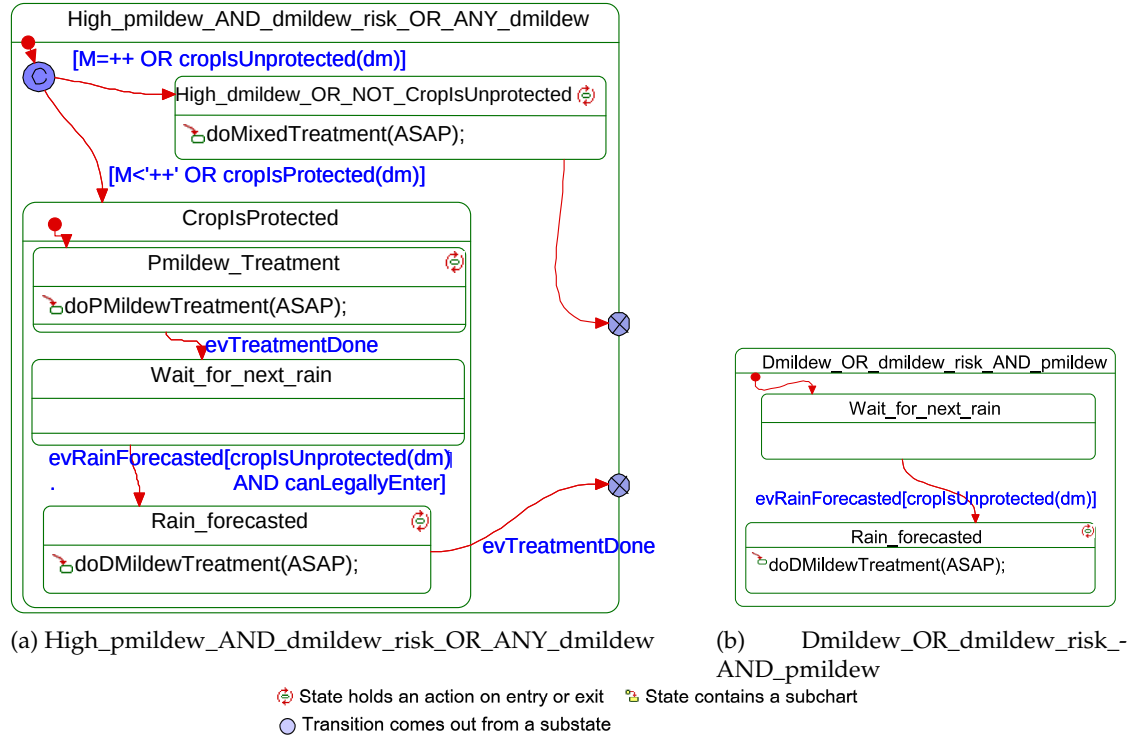


Figure 5.12: Substatecharts from Stage_2

Having presented the general context of Stage_2, we shall give some of the interpretation keys of the decision making in Stage_2. Starting from the default transition, following the upper branch ③, implies that the powdery mildew treatment (“T1O”) was done early (i.e. $[NOT cropsSafelyProtected(pm)]$) and that the powdery mildew epidemic is high. Then powdery mildew treatment should be renewed right away. The level of downy mildew will distinguish the substate that activates (2nd conditional node ④).

The same type of reasoning is applied in the lower branch: either powdery mildew was well controlled thanks to “T1O” or the treatment was applied recently w.r.t. Stage_2’s entry and the plot is protected (i.e. $[O<'++' \text{ OR } cropsSafelyProtected(pm)]$). This justifies that no immediate action be taken against powdery mildew.

When both observed disease levels are low, or well protected, **Wait_and_watch_ILM** is activated ⑤. Then, when ILM turns to ‘+’, there are two possible behaviours: (i) state **Dmildew_risk AND_pmildew** is activated and the weather watch procedure begins; however (ii) if the flowering has started ($BBCH \geq 60$) then Stage_2 is exited right away, and treatment “T3”, in state Stage_3, will be applied in lieu of “T2”.

The rest of the behaviour of Stage_2 is left to read on Figure 5.11. It follows the same “process vocabulary” presented in stages 0 and 1. Details of the substatechart of state **High_pmildew_AND_dmildew_risk_OR_ANY_dmildew** is found on Figure 5.12(a). There, the AP management will cause either to order a mixed treatment immediately or to have first the powdery mildew treatment done and then if required by the forecasted weather conditions the downy mildew treatment is ordered. This setup permits to adjust precisely on the level of downy mildew risk. For instance, when the plot is protected or

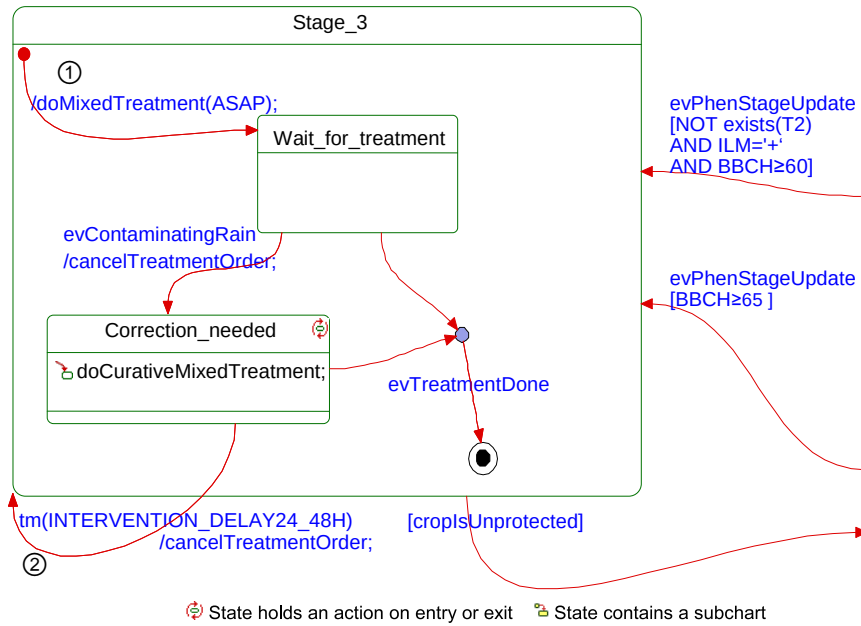


Figure 5.13: GrapeMilDeWS Stage_3

the epidemic is moderate. Our aim is to attempt to spare a downy mildew treatment, but at the risk of having to spray twice.

Figure 5.12(b) is again a version of the weather watch procedure. However here, the AP is taken into account before ordering the downy mildew treatment.

5.4.4.7 Stage 3

The substatechart of Stage_3 is shown in Figure 5.13.

Stage_3 has already been partly discussed in the previous sections. This stage holds the third and key treatment “T3” in the *GrapeMilDeWS* strategy. It protects the flowering period which is recognized as the most critical time during the season w.r.t. powdery and downy mildews. “T3” can be ordered according to two different modalities. First, as “T2M” is skipped “T3” is done early in the flowering([*NOT exists*(T2) AND ILM = ‘+’ AND BBCH ≥ 60]). Otherwise, if “T2M” was done, it still protects the early flowering, and “T3” will be done at mid flowering. The end of the active periods are synchronised after “T3” since products with long lasting effects against both diseases(see section 5.4.4.12 and 5.4.4.11) are used at Stage_3 which simplifies the scheduling of the work later on.

error recovery procedure Stage_3 substatechart shown in Figure 5.13, represents the error recovery procedure which is also associated with every other states ordering a downy mildew treatment or a mixed one. In *GrapeMilDeWS*, we try to avoid downy mildew treatment when no rain is forecasted. Eventually the rain may fall before the treatment can be carried out. In this case, the procedure is identical to that of Stage_3 (except for the actions target which may be either downy mildew or both diseases).

On entry, “T3’s” mixed treatment is ordered ① (with the product selected according to

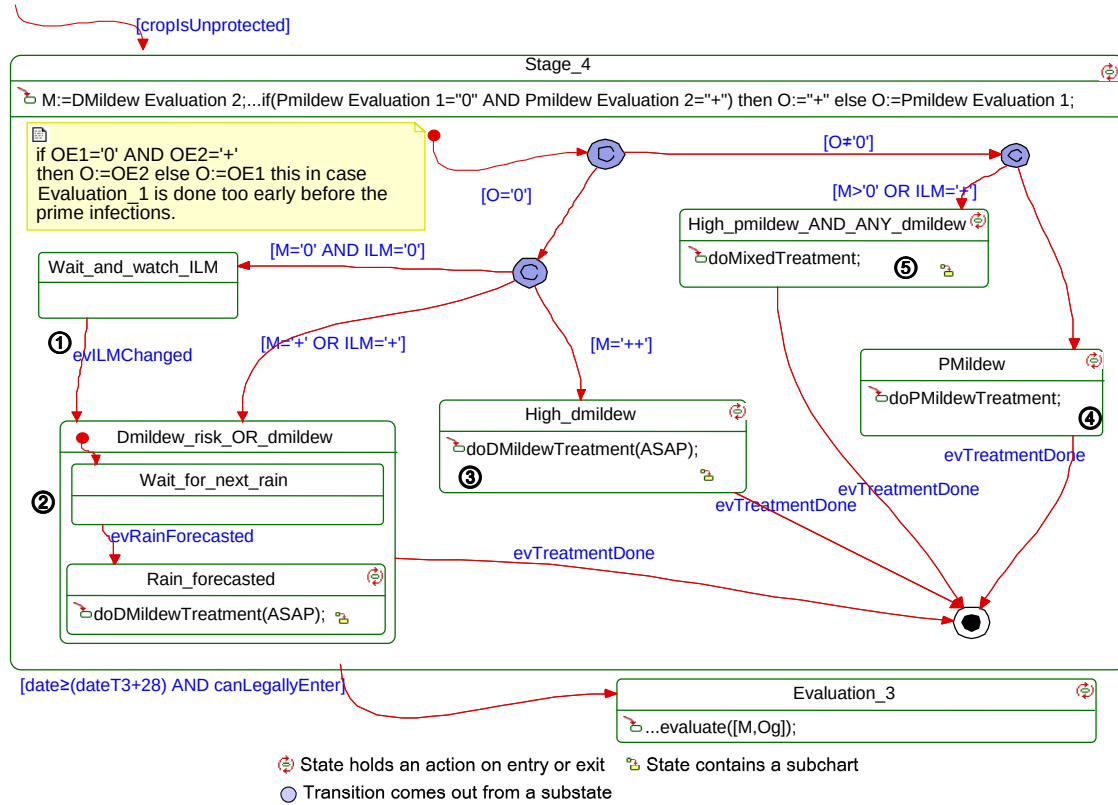


Figure 5.14: GrapeMilDeWS Stage_4

the product selection rule, see section 5.4.4.11). State `Wait_for_treatment` is activated. Eventually, if a contaminating rain occurs before the initial order is executed, emergency actions will be needed to limit the proliferation of the inoculums.

The recovery procedure is to cancel the preventive treatment and replace it by a curative treatment. Depending on the temperature, the curative treatment must be done in less than 24 to 48 hours. Otherwise, the damages are irreversible and the curative treatment becomes useless, therefore the normal process is resumed, Stage_3 is re-entered ② and the mixed treatment ordered again.

5.4.4.8 Stage 4

The substatechart of Stage_4 is shown in Figure 5.14.

Stage_4 is entered after the end of “T3’s” AP. In years with intense early epidemics, the goal of this stage is to protect the growth of the berries, when they are still green, growing and susceptible (pea size: $BBCH \approx 73$). This optional treatment stage should not yield treatment applications on low epidemics years. As for Stage_3, the variables *O* and *M* are not updated before entering Stage_4. Nonetheless, their values are refreshed according to the following rules:

if OE1 = '0' and OE2 = '++' then O := OE2 else O := OE1
M := ME2

O will take the value it had after Evaluation_1 (‘OE1’), except when no powdery mildew was found during “E1” and yet high powdery mildew was observed 15 day later during



Stage_4 is most illustrative of the general logic of the decisions taken in GrapeMilDeWS (Except for the variables re-assignment on entry). When the pre-flowering epidemics have been low, then only ILM monitoring is done ① . If downy mildew increases in the area, then the weather watch will be started ② . If only one estimator is high, then only its target disease will be treated ③ ④ . Finally, when both powdery and downy mildews estimators are above nil or when risks of downy mildew exist in the area, then a mixed treatment is ordered ⑤ .

5.4.4.9 Stage 5

Following Evaluation_3 the system receives a refreshed view of the plot's sanitary



Figure 5.16: Substatecharts from Stage_5

status. Variable Og is used to estimate the intensity of the powdery mildew epidemic on the bunches. Based on this information, if Og is high, ① a treatment is ordered in all cases, whereas no powdery mildew treatment is requested when low. If M is low, then no downy mildew treatment is needed ② ③. Weather watch is activated when at Evaluation_3, M='+' ④ ⑤. When M='++' a downy mildew treatment is requested as soon as possible.

In state High_pmildew_AND_high_dmildew (for short: S5.HPHD) is more complex than most substates because powdery mildew on the bunches was found high at "E3" and protection against that disease must therefore be renewed on entry of Stage_5. However, protection may still be active against downy mildew (from late "T4M"). Thus sparing a treatment becomes possible if the weather remains dry.

This translates on S5.HPHD's Statechart (Figure 5.16(a)) into the following procedure: if downy mildew treatment "T4M's" AP is nearly over ([NOT cropIsSafelyProtected(dm)]) then (i) the treatments are mixed. Otherwise, (ii) the powdery mildew treatment is done first, then (iii) the weather watch procedure is started and the downy mildew treatment done only when the rain is forecasted. After the beginning of ripening ([BBCH ≥ 81])

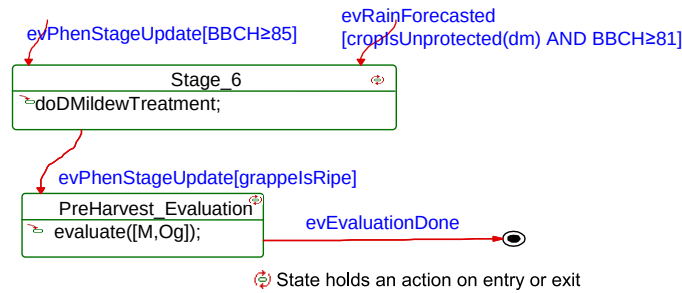


Figure 5.17: GrapeMilDeWS Stage_6

the advent of a rain will force “T6” to be done in advance and thus “T5M” is spared. (iv) HPHD is exited through the GOTO_Stage_6 “shortcut” (drill-trough Figure 5.15 and Figure 5.16(a)).

In general at Stage_5, the weather watch procedure are all modified as presented above, to attempt to spare a downy mildew treatment by applying “T6” at early ripening instead.

5.4.4.10 Stage 6

The Statechart part of [GrapeMilDeWS](#) containing Stage_6 is shown in Figure 5.17.

Stage_6 is essentially a mandatory “Bordeaux mixture” (copper) treatment. Its aim is to protect the leaves against late downy mildew epidemics which can cause defoliation, thus damaging the maturation of the grapes. As explained in the above section it may be advanced from mid ripening ($BBCH \geq 85$) to early ripening ($BBCH \geq 81$) to allow sparing “T5”. The advantage of copper treatment is that it is not photo reactive. Therefore it offers a long lasting protection. Only rain can actually wash it off. Yet “T6” is sufficient to protect the maturation of the fruits which are not susceptible to powdery and downy mildews. This treatment will not be renewed, even if washed. Indeed partial defoliation is acceptable when it occurs late enough, because the stocks have reserves to carry out maturation to its term (Candolfi-Vasconcelos et al., 1994; Hunter et al., 1995). However, systematic defoliation may, in the long run, tire out the stock and jeopardize production. As a consequence Stage_6 should be entered as late a possible whenever the weather permits.

We recommend before harvest a last optional evaluation to assess the quality of the [GrapeMilDeWS](#) program, no management decision is associated with Preharvest_evaluation. This concludes the main process of GrapeMilDeWS. The dormancy period is not taken into account and the program needs to be reset each spring.

After going through the main decision making process of GrapeMilDeWS, the next two sections present the product choice mechanisms involved when treatments are ordered.

Cur. Stage	Conditions	Product Type	Cur. Stage	Conditions	Product Type
Stage_0		→ Contact or Prevading	Stage_1		→ SBI type 1
Stage_1	$M = ++$	→ Curative	Stage_2		→ Strobilurin
	$\hookrightarrow closeToE1$	→ Systemic	Stage_3		→ Strobilurin
		$\hookrightarrow$ ANY Protectant	Stage_4		→ Quinoxifen
Stage_2	$closeToE2$	→ Systemic	Stage_5	$NOT existT2$	→ Strobilurin
		$\hookrightarrow$ ANY Protectant			$\hookrightarrow$ SBI type 2
Stage_3	$M = ++$	→ Curative			
		$\hookrightarrow$ Systemic			
Stage_4		→ ANY Protectant			
Stage_5		→ ANY Protectant			
Stage_6		→ Bordeaux mixture			

(a) Targeting downy mildew

(b) Targeting powdery mildew

Table 5.1: GrapeMilDeWS product selection rules

5.4.4.11 Downy mildew product choice

In GrapeMilDeWS, the types of products are structured according to their mode of action and properties, as inclusive sets (Figure 5.18). When the larger set is recommended for an application, any type of products belonging to that large set may be chosen. The specific choice is left to the vineyard manager.

By default, protectant fungicides are chosen against downy mildew. If the error recovery procedure is activated, then curative products are selected.

In the case of a treatment during Stage_0 (see Table 5.1(a)), the choice of a contact or a pervading product is made, both for their partial systemic properties and their short active period. Thus “T0” will have a small disruption effect on the timing of “T1”.

If $M = ++$ in Stage_1 then a curative treatment will be ordered as soon as possible (section 5.4.4.5). Otherwise, the product choice will depend on the desired length of the active period: (i) the application is done early ($closeToE1$) then a systemic treatment will offer a longer lasting protection than (ii) the protectant fungicide chosen by default. That same reasoning holds for “T2”.

“T3” should be systemic in most cases, except when during a second evaluation $M = ++$. Then a curative treatment is preferred, as the epidemic started on a high trend. Finally, the last treatment in Stage_6 will use copper based products for its long lasting efficiency.

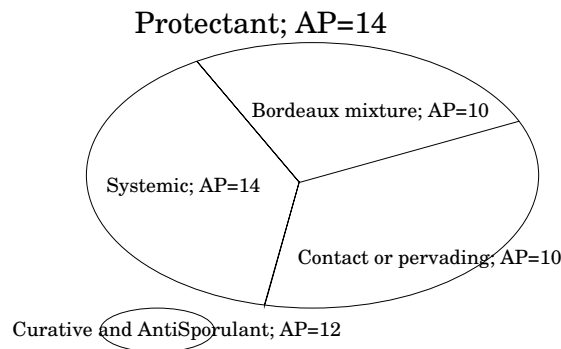


Figure 5.18: Partition of the families of products targeting downy mildew

5.4.4.12 Powdery mildew product choice

Products need to be diversified in order to lower the risk of selecting a resistant stock of *Erysiphe necator*.

Four kind of active molecules may be used during the season. The mandatory treatments should be done using Sterol Biosynthesis Inhibitor (SBI) (at Stage_1 see Table 5.1(b)) and Strobilurin (at Stage_3). The optional Stage_4 treatment will be done using either Quinoxifen or Metrafenon. An extra Strobilurin treatment is allowed in the limit of two applications overall ("T3"+"T2" Or "T5") Thus "T5" will use Strobilurins only if no powdery mildew treatment was applied at "T2" otherwise (see Table 5.1(b) last line) "T5" should use a SBI of the second group.

This concludes the section dedicated to presenting GrapeMilDeWS.

5.4.5 Discussion

The discussion will be restricted to the innovation of the approach in the field of IPM and to the advantages of the formal representation. The quality of the IPM solution, with respect to the experimental results and the accuracy of the modelling shall be discussed in a second article (GrapeMilDeWS part 2 (Léger et al., 2008b)).

5.4.5.1 GrapeMilDeWS an IPM decision Workflow

General practice in IPM is to establish a reliable model of the pathogen development and then discover the decision thresholds which control the epidemics. During our preliminary experiments (2001-2004), risk models were used, EPI (Tran Manh Sung et al., 1990) and Milvit (Rouzet and Jacquin, 2003). It led to over protection as these models are not adapted to the plot scale (epidemics would be predicted when no epidemics developed at our plot scale). These false positive predictions showed that some factors were missing in these models. Since, we have preferred field observations, although the Milvit model is still taken into account through the plant protection service advisory bulletins used to update the ILM variable. The plant protection service uses Milvit to build the forecasts included in the disease information bulletins.

Choosing observations, introduced operational problems. The designers had to take into account multiple criteria: efficiency of the IPM program, workload and cost. Farmers know well these type of multiple criteria strategy design problems (Girard and Hubert, 1999). The chosen solution is both pragmatic and scientific: (i) make a limited number of field observations positioned at strategic time and cut the crop protection decision making in sub goals: the stages, designed according to the sensitivity of the plant. This approach is consistent with the way farmer organize their activity and make decisions (Papy, 1998).

Coupling the control of both Powdery and Downy mildews is again consistent with common practices; and is quite original in IPM: no IPM strategy targeting multiple pathogens was found in the grapevine literature. Originally our concern was focused on the operationnality of the process and led us toward this multiple pathogen management decision workflow.

Compared to having two strategies and trying to manage the conflicts, our solution leads to a few tradeoffs between the optimal management of both pathogen taken separately. The advantage is that these tradeoffs are rationalised and can be quantified by the experiments.

The whole project is influenced by the “decision process and action model” theory (Sebillote and Soler, 1988). However, the action model theory is a diagnosis tool of farmers’ practices. In our case, the designers are pathologists and the goal is to represent the decision process they have created. Here the formal modelling language served as a tool for an exhaustive and explicit transfer of process knowledge toward other researchers.

Further work will be dedicated in transferring this tool to the professionals. In order to achieve that goal, a DSS will be designed. This formal model will also be used for controlling the scalability of the solution. We are involved in a design loop, modification will be made if the present design proves too costly. However before moving onto this path, *GrapeMilDeWS* will be agronomically evaluated at a wider scale. These experiments justify an exhaustive model for knowledge transfer between R&D participants, as the designers will not be able to manage all these experiments.

5.4.5.2 Formal graphical modelling

In this section, we shall investigate why formal process modelling is novel and promising.

Building simulation models for decision making is quite common in systems agronomy (Attonaty et al., 1999, 1994; Cros et al., 2001; Wauchope et al., 2003), however, formal modelling using the engineering approach as proposed in Zheng (2006), is not developing in agriculture. Although the trend is rapidly acquiring momentum in the fields of systems biology (Webb and White, 2005), manufacturing (Baresi et al., 1997; Castillo and Smith, 2002) and medical research (ten Teije et al., 2006).

As Harel (2004) advocates, the tools developed in computer science to model and verify the behaviour and properties of complex real time systems are now mature and can be used in other systemic sciences. Systems such as an immune system (Cohen, 2007) or a complete *Caenorhabditis elegans* nematode worm (Kam et al., 2003) have been modelled formally integrating the available knowledge from the literature.

Simulations associated with animation (Harel et al., 2002; Philippi and Hill, 2007) permits the expression and step by step observation of emerging behaviours which in turn can be researched either for complement in the literature (under-specification of the model) or through new in vivo experimentations. This approach permits to represent knowledge at different scales, levels of details and of abstraction. Yet the most interesting feature of systems formal modelling is the ability to do “Model Checking” (Alur and Dill, 1994).

Model checking is a set of technique using modal logics to prove temporal or even real time (Yovine, 1993; Penczek and Pólrola, 2006) properties of systems: reachability, vivacity and safety. Safety for example permits to control that a forbidden state of the system can never be active. This is achieved without the need to test all possible con-

figuration in simulations. In our case a safety property that can be checked would be to guaranty that no curative treatment will be applied later than 48h after a rain event on an unprotected plot. In agronomy, Model checking has been used by [Largouët \(2000\)](#) on a land use problem and by [Hélias \(2003\)](#) in organising the use of pork effluent for the fertilization of sugar cane fields.

In order to apply model checking, a formal model is required (i.e. the model should have an equivalent formulation in a finite state automaton formalism). Here, we focus on the graphical representation of such formal model. There are several DES graphic modelling languages. But the majority refer to either Petri net's or state based modelling ([Mosterman and Vangheluwe, 2004](#)).

We chose Statechart for its intuitiveness. Based on higraphs ([Harel, 1988](#); [Grossman and Harel, 1997](#)), it is efficient for the visual representation of union and conjunction. Among the variety of Statechart, we chose Rhapsody's ([Harel and Kugler, 2004](#)) which is UML compliant, but [Glinz](#) (he proposes truth tables for complex triggering conditions) may prove more adapted to readers unfamiliar to the notation as [Cruz-Lemus et al. \(2005\)](#) indicate in their study of the ergonomic of the Statechart language. Our experience working with experts is that Statechart requires some learning time, but are able to represent both logical rules, and sequentiality. The nesting capabilities allow to focus on different mater at different scales.

5.4.6 Conclusion

We presented two innovations in this paper. The first is methodological, with the use of a formal graphical language for the modelling of processes and decisions, that is workable in agriculture, with the advantage of being mathematically sound and of producing executable software, with a wide variety of implementations available ([Harel et al., 1990](#); [Telelogic, 2007](#); [IBM, 2007](#); [Gentleware, 2007](#); [Mathsworks, 2008](#)) producing implemented code in different programming languages.

The second point of this article, was to present the GrapeMilDeWS decision workflow itself. Its novelty is both due to its expert workflow based approach at reducing the number of application to grapevine, and to the proposition of an IPM solution that is very flexible in the number of treatments, reducing the number of applications when possible, and protecting when required, while taking into account the farmers operational constraints.

5.5 Discussion du Chapitre

Il s'agissait ici de donner une vision exhaustive du modèle Mildium tel qu'il a été recueilli au cours de l'année 2006 auprès des experts concepteurs grâce à la méthode présentée au chapitre 4. Dans le cadre du processus de conception itératif dans lequel ce travail se situe, le modèle présenté correspond à une version.

Mildium a été expérimenté de manière experte (c'est à dire sans le modèle) pendant les saisons 2005 et 2006 à Bordeaux. Puis au cours de l'année 2007, le modèle a été utilisé par les experts comme référence pour leurs expérimentations à Bordeaux. Enfin en 2008, ce modèle a servi de base aux expérimentations menées dans le cadre du projet " Conception et transfert de systèmes décisionnels pour une réduction des traitements phytosanitaires sur vigne " (SyDéRéT)^g dans divers vignobles méridionaux..

Grâce à l'établissement d'une version, un travail d'étude systématique qui comprend à la fois la validation informatique et l'expérimentation permet de produire un corpus de connaissances qui pourra être associé à la phase de « conception & amélioration » suivante. Ainsi, il a été possible au cours des années 2005 à 2008 d'expérimenter le POD dans divers contextes épidémiques annuels et dans plusieurs régions et donc d'accumuler des observations. En 2009, une nouvelle version du [POD](#) devrait être reformulée prenant en compte l'expérience acquise.

Séparer nettement les phases d'innovations des phases d'études et d'expérimentations, relève de la même démarche qui m'a poussé à refuser la réalisation d'un système expert à portée générique. Il me semblait qu'un système trop versatile eut été difficile à étudier alors qu'avec l'approche processus adoptée, l'ensemble des comportements reste plus restreint. Cependant, l'étude d'un procédé comme Mildium dans ses composantes décisionnelles, temporelles et biologiques, reste encore le sujet d'un questionnement méthodologique.

Le choix de fixer et d'identifier les versions permet simplement de documenter les évolutions, d'associer une modification à une difficulté due aux expérimentations faites aux champs ou à l'analyse du modèle (par simulation par exemple). Cette volonté de produire une conception incrémentale, si elle est répandue dans le domaine du génie logiciel, est finalement assez rare dans le domaine de la protection des végétaux.

Rappelons que la démarche de conception de [POD](#) menée à Santé Végétale est innovante en ceci qu'elle propose une abstraction du raisonnement de la protection par rapport à son instanciation réelle sur la base d'indicateurs concrets.

5.6 Conclusion du Chapitre

Le modèle présenté ici est issu du recueil de connaissances. Il s'agit d'une version intermédiaire du procédé Mildium à replacer dans un processus de conception itératif. Le modèle a été accepté par les experts lors du recueil (voir chap. 4). Une approche quantitative restait nécessaire pour estimer la qualité du modèle. La méthode de validation fait l'objet du chapitre 6.

g. retenu en 2008 à l'Appel à Projets Protection Vigne (A2PV) du Ministère de l'Agriculture

Chapitre 6

Validation du POD

Contents

6.1	Simuler Mildium pour valider le recueil de connaissances	159
6.2	Matériel et Méthodes	159
6.3	Présentation de l'article	160
6.4	Article « GrapeMilDeWS (Part.2) Expérimentation d'un POD PIC contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne »	161
6.4.1	Introduction	162
6.4.2	Materials and Methods	164
6.4.2.1	Relevance of the experts' <i>oeGrapeMilDeWS</i> as a crop protection strategy through a field experiment approach.	164
6.4.2.2	Running Simulations of the GrapeMilDeWS elicited model	166
6.4.3	Results	169
6.4.3.1	Performance obtained by experts experimenting <i>oeGrapeMilDeWS</i>	169
6.4.3.2	Analysis of the similarity of the experimental and simulated decision workflows	172
6.4.3.3	Analysis of the Decision/Action sequences in experiment and simulations	176
6.4.3.4	Discussion about the causes of discrepancies between experiments and simulations	181
6.4.4	Discussion	182
6.4.4.1	GrapeMilDeWS and expert knowledge	182
6.4.4.2	Managing two diseases in the same crop protection strategy	183
6.4.4.3	The burning issue of monitoring	183
6.4.4.4	Acceptability and risk management	185
6.4.5	Conclusion	186
6.5	Discussion du Chapitre	188
6.5.1	Méthode de validation	188
6.5.2	Résultat de la validation : les points critiques	188
6.5.3	Généricité de la méthode de validation	189

A l'issue du recueil d'expertise et de la modélisation, la question se posait de la validation de Mildium.

6.1 Simuler Mildium pour valider le recueil de connaissances

Dans un premier temps, il a fallu clarifier les objectifs et le type de validation que l'on pouvait effectuer sur ce modèle. C'est à cette occasion que l'usage de modèles biotechniques a été définitivement exclu de ma démarche. En effet, l'opportunité de réaliser un modèle biotechnique du multi-pathosystèmes *E. Necator* + *P. Viticola* + *V. Vinifera* a été analysée. L'usage d'un modèle biotechnique pour la validation du POD aurait eu l'avantage de permettre l'évaluation de la qualité agronomique du POD, notamment d'en étudier la sensibilité au scénario climatique. L'unique modèle biotechnique candidat a été développé au sein du projet ADD-Vin (Deola et al., 2007; Bazoche et al., 2008). Il s'agit du modèle « bio-économique » déjà évoqué

Le recours à l'expertise pour développer les stratégies nous est imposé par manque de connaissances scientifiques. Il en va de même pour le modèle « bio-économique » qui a été construit sur base bibliographique avec un paramétrage expert. Les résultats ne donnent accès qu'à des indications qualitatives.

Une hypothétique tentative de validation du POD Mildium avec ce modèle aurait donc consisté à confronter une expertise à une autre expertise. Il m'a donc paru inopérant de tenter ce type de validation. Ceci n'invalide pas l'intérêt d'un travail de simulation sur Mildium interfacé au modèle bio-économique à titre exploratoire.

L'analyse a permis de conclure que l'objectif de la validation du modèle était de montrer que le modèle simule l'expertise, c'est à dire qu'il est possible de reproduire les décisions prises par les experts au cours des expérimentations menées avant l'établissement du « Mildium formel ». Nous avons donc conçu et mis en œuvre une méthodologie de validation dans cet objectif.

Le troisième article (« *Working paper* »^a) qui constitue le corps de ce chapitre présente mon travail de validation de la conformité des décisions prises par le modèle « Mildium formel » (Mf) noté GrapeMilDeWS avec celles prises par les experts mettant en œuvre Mildium noté « Mildium expert » (Mx) en Français et original expert GrapeMilDeWS (oeGrapeMilDeWS) en Anglais. Les premiers résultats agronomiques sont également présentés afin de montrer l'efficacité pratique d'un POD.

6.2 Matériel et Méthodes

La section 6.4.2 présente d'une part le dispositif expérimental bordelais et d'autre part la méthodologie de validation du modèle qui se décompose de la manière suivante :

- construction des scénarios d'entrée du simulateur
- stratégies de simulation en l'absence de modèle biotechnique
- les méthodes de comparaisons et d'analyse des différences « simulations *vs* expérimentations ».

a. décliné le 09/10/2008 par l'un des éditeurs d'*Agricultural Systems* comme hors du domaine de la revue, sans évaluation par des juges arbitres

NB. les données des scénarios de la simulation ne sont pas données dans l'article mais en annexe E.

6.3 Présentation de l'article

L'article est structuré de manière traditionnelle avec une partie « matériels et méthodes » et une partie consacrée aux « résultats ». Dans chacune de ces parties, on présente dans un premier temps, les expérimentations de Mildium au champ qui ont été menées à Bordeaux sur quatre parcelles pendant les saisons 2005 et 2006 (protocole expérimental section 6.4.2.1 ; performance agronomique section 6.4.3.1).

Remarque : *Afin d'ajuster les seuils de décision des différents indicateurs parcellaires (M, ILM, O, Og), chaque parcelle a fait l'objet d'une hypothèse alternative au cours de chacune des deux saisons étudiées (parcelle coupée en deux). Au final, il y a 15 historiques de décisions disponibles (une parcelle n'ayant pas été coupée en deux en 2005).*

Le second temps de chaque partie présente la validation du modèle formel. En section 6.4.2.2, on montre comment, par simulation, on cherche à reproduire les décisions prises par les experts avec le modèle Mf. On reconstruit les scénarios climatiques et les scénarios d'évènements auxquels les experts ont été soumis pendant les deux saisons étudiées à partir des données conservées dans les historiques d'expérimentations. Les données pour ces scénarios sont disponibles en annexe E. La dernière sous-partie de « matériels et méthodes » précise comment est évaluée la similitude des décisions entre les simulations et les expérimentations. Cette comparaison se fait en trois temps. On compare d'abord le nombre de traitements ordonnés. On compare ensuite les décisions en terme de choix et de dates (date d'observation, décision d'application d'un traitement optionnel et date de cette décision). Enfin, on observe au sein des séquences réelles et des séquences simulées, la distribution des écarts relatifs entre deux décisions (par exemple le temps entre la première évaluation et la date de décision du traitement anti-mildiou à l'étape 1), voir section 6.4.3.2 & section 6.4.3.3.

Chacune de ces trois analyses permet de tirer des enseignements sur la qualité du recueil de connaissances et de la modélisation (85% de décisions^b sont identiques avec cependant des différences temporelles) mais également des enseignements sur la manière dont les experts ont mené leurs expérimentations qui renseigne sur certaines pratiques non exprimées pendant le recueil de connaissances (section 6.4.3.4).

La discussion reprend les résultats de la validation et aborde les points suivants : la façon dont les experts ont su mobiliser leurs connaissances scientifiques pour concevoir Mildium ; l'intérêt qu'il y a à gérer deux maladies dans une même stratégie ; les difficultés liées aux observations, particulièrement en ce qui concerne le suivi de la phénologie ; et dernier point de la discussion, l'acceptabilité de la stratégie dans une perspective de transfert.

b. Il y a 15 situations de décision dans Mildium qui sont comparées selon 16 scénarios soit au total 240 décisions simulées vs 240 décisions expérimentales.

**6.4 Article « GrapeMilDeWS (Part.2) Expérimentation d'un POD
PIC contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne »**

“Working paper” décliné le 09/10/2008 par l’un des éditeurs d’*Agricultural Systems* comme hors du domaine de la revue, sans évaluation par des juges arbitres .

GrapeMilDeWS (part.2) experimenting an integrated pest management (IPM) Decision Process against grapevine powdery and downy mildews

Bertrand Léger^{§*} and Olivier Naud^{*} Michel Clerjeau[•] Véronique Bellon-Maurel^{*} Laurent Delière[§] Philippe Cartolaro[§] Lionel Delbac[§]

^{*}Cemagref - UMR ITAP - BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5

[§]INRA - UMR Santé Végétale -BP 81 33883 Villenave d’Ornon Cedex

[•]ENITA Bordeaux - 1, cours du Général de Gaulle CS 40201 33175 Gradignan Cedex

Abstract

GrapeMilDeWS is an expert based strategy for the integrated pest management of the vineyard (*Vitis vinifera*), at plot scale, against two cryptogamic diseases: powdery and downy mildews (*Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola* resp.). It aims at reducing pesticides use on low epidemics years while always securing production output. [GrapeMilDeWS](#) was experimented for two years on 4 plots (≈ 0.5 ha each) on 2 sites near Bordeaux. The results show that [GrapeMilDeWS](#) yields to about 50% reduction in the number of fungicides treatments and satisfactory quality and quantities at harvest. A formal and exhaustive Decision Workflow System (DeWS) model of [GrapeMilDeWS](#) was elicited from the expert designers (phytopathologists and crop protection engineers). The model is detailed in Part.1 as we consider this model as the best available description for transferring [GrapeMilDeWS](#)’ knowledge. This assumption had to be assessed by checking that the model makes decisions consistent with the experts’ ones during experiments. Such assessment is provided here, together with results about performance of [GrapeMilDeWS](#). The model is shown highly consistent with experts’ decisions (85% identical decisions). Yet, there are some temporal discrepancies which are analysed and discussed.

6.4.1 Introduction

With only 3% of the land use in France, viticulture is responsible for 20% of the pesticide treatments ([Aubertot et al., 2005](#)). According to ([ASK, 2000](#)) powdery mildew and downy mildew (respectively caused by *Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola*) are considered by French vine growers as the two most important diseases, leading to the highest number of treatments. The common preventive crop protection strategies are indeed efficient. Yet, on most years, a number of these applications are unnecessary. Therefore, it is desirable for a sustainable viticulture to find means to avoid these.

We advocated in [GrapeMilDeWS](#) (part.1) ([Léger et al., 2008a](#)), that, by monitoring epidemics at the plot level, together with some local bioclimatic information about downy mildew, it is possible to manage crop protection over the whole season and to apply treatments only when required. Based on crop protection expertise, a team of grapevine pathologist experts designed a first decision workflow, which was a collection of guidelines and tables, to implement these principles. The team experimented its design, which

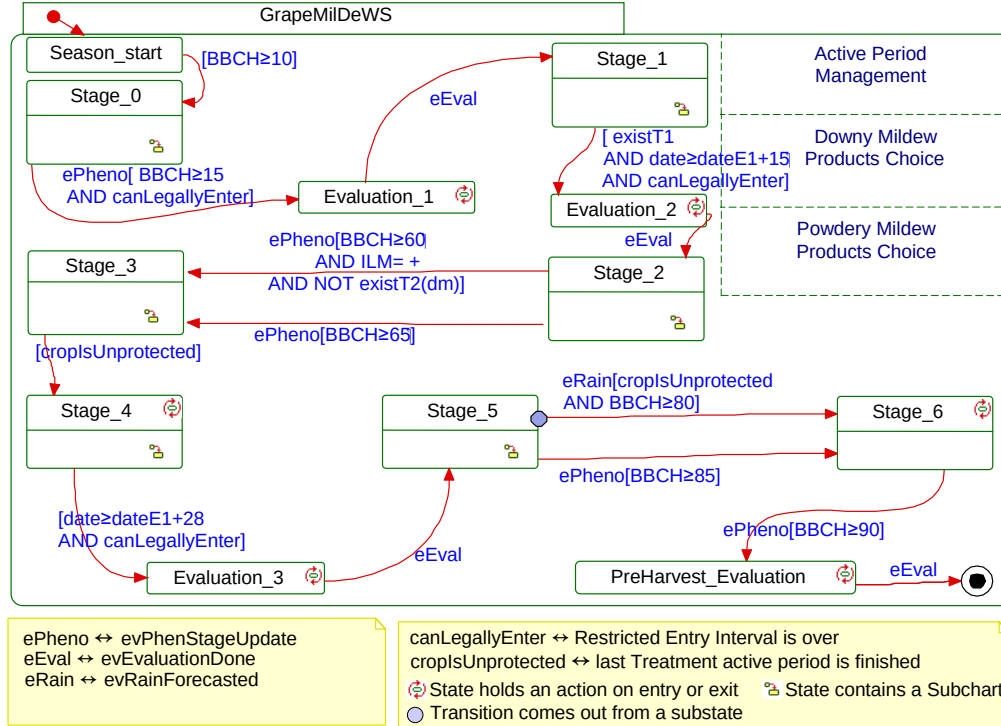


Figure 6.1: GrapeMilDeWS main process view

we will hereafter refer to as *oeGrapeMilDeWS* (for original expert GrapeMilDeWS), for two years. In the meantime, the whole expertise was elicited as a formal model in Statechart (Léger and Naud, 2007). Statechart (Harel, 1987; Harel and Kugler, 2004) is a formal language which is both graphical and mathematically sound (i.e. it can be compiled). Such a formal model was meant to: (i) to clarify the design; (ii) as a transfer tool to communicate the experts' ideas with little ambiguity and (iii) as a simulator for computer virtual experiments.

Theoretical details of the *GrapeMilDeWS* model (for Grapevine powdery and downy Mildew Decision Workflow System) are presented in part.1. This model is based on a succession of decision stages where decision variables, updated from plot diseases observations, are combined with phenological stage and climatic data to decide the applications of fungicides and to specify their timing. The observations in the field are represented in the model as evaluation states which interleave with the decision stages. Figure 6.1 gives the general organisation of the decision workflow.

In this second article, we show that *GrapeMilDeWS* provides an efficient crop protection with a reduced number of fungicide treatments. We also show that the formalised *GrapeMilDeWS* contains the necessary information to reproduce the experts' decisions.

First, the experimental setup and results of two years (2005 and 2006) of field experiments are presented. Second, these results are discussed in details through a confrontation of the decisions made by the experts during the experiments and the ones provided by the formal model elicited from the expert knowledge. Finally, we discuss our results and question the transferability of *GrapeMilDeWS* decision procedure.

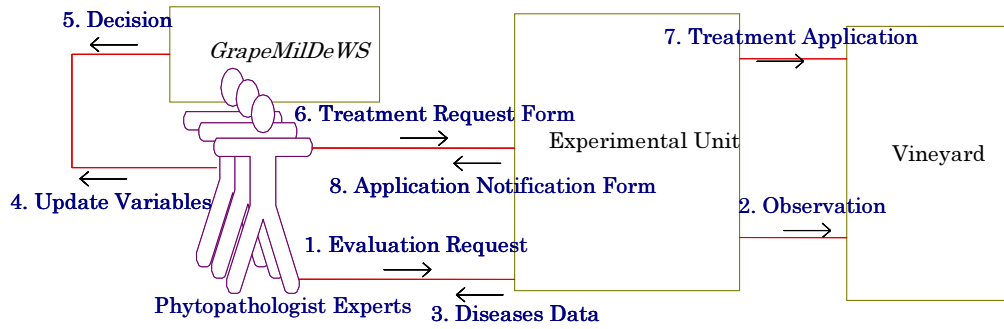


Figure 6.2: *oeGrapeMilDeWS*' communication flow

6.4.2 Materials and Methods

This first section is organised as follows: first, we describe the experimental protocol designed to assess *oeGrapeMilDeWS* as an efficient crop protection strategy; then we present our methodology for the validation of the elicited formal model (*GrapeMilDeWS*).

6.4.2.1 Relevance of the experts' *oeGrapeMilDeWS* as a crop protection strategy through a field experiment approach.

Experimental setup The first design of *oeGrapeMilDeWS* was informal, in the sense that the original documentation for guidelines was insufficient to capture all the knowledge the experts actually use while experimenting (Léger and Naud, 2007). All experiments presented here were conducted with this informal decision process description. *oeGrapeMilDeWS* was tested in 2005 and 2006 on four plots in two experimental vineyards of the French national institute of agronomical research (INRA), near Bordeaux.

The first experimental site is located in the village of Latresne south east of the city of Bordeaux. It produces a “premier cote de Bordeaux” registered designation of origin (RDO) wine. The second site is in the city of Villenave d’Ornon (south of Bordeaux). It produces a “Pessac Léognan” RDO wine. In each case, two plots were selected, with two cultivars: Merlot and Cabernet Sauvignon.

The two Latresne (Lat.) plots were planted in 1997. Each one has an area of 0.28ha and a density of 5050 stocks/ha. Two trellis systems are used: half the stocks is managed with double Guyot and the other half uses double cordon de Royat.

On the Villenave d’Ornon (V.O.) site, both plots have double Guyot trellis systems. There, Merlot (M) and Cabernet Sauvignon (CS) were planted respectively in 1991 and 1993, at a density of 6250 stocks/ha. The respective areas are 0.25ha and 0.35ha.^c

Two types of actors were involved into the experimental implementation of *oeGrapeMilDeWS* : (i) the phytopathologist experts who made the decisions and (ii) the INRA experimental unit staff who executed the decisions. Figure 6.2 summarizes the communication between these actors.

The decision variables defined in *oeGrapeMilDeWS*' are described in *GrapeMilDeWS* part.1, section 3.3. Three variables account for epidemic pressure at the plot scale: *M* for downy mildew on leaves, *O* and *Og* for powdery mildew respectively on leaves and clusters. Their values result from a sampling protocol which is given hereafter. ILM

c. Map of the experimental sites on the internet: <http://tinyurl.com/2zpgpo>.

accounts for downy mildew pressure at a bioclimatic region scale (about 20km radius around the plot). Rain forecasts are also used in the decision process.

Using these variables, the experts decided the opportunity of a fungicide application. The decisions were then transmitted as treatment orders to the experimental unit staff in charge of the two vineyards. Traceability was ensured by the use of a formalised procedure using “*Treatment Request Forms*” (TRF) transmitted for orders and “*Application Notification Forms*” (ANF) sent in return after the applications were carried out.

A TRF was composed of a target disease, a proposed product (or class of products) and an application period. The “application period” may be expressed as a phenological stage, a time interval (usually a week) or the date of a forecasted rainfall as a deadline. The experimental unit then adjusted the exact application date according to its operational constraints (availability of the human resources as well as mechanical ones, regulations, weather and soil conditions).

Assessment	Powdery mildew			Downy mildew		
	-	+	++	-	+	++
E0 (M)	-	-	-	0%	> 0%	-
E1 (M-O)	0-2%	2-10%	> 10%	0%	0-10%	> 10%
E2 (M-O)	0-20%	-	> 20%	0-10%	10-50%	> 50%
E3 (M-Og)	0-20%	> 20%	-	0-10% or $E3 - E2 = 0$	10-50% and $E3 - E2 > 0$	> 50% and $E3 - E2 > 0$

Table 6.1: Thresholds used in the 2005 & 2006 experiments for each evaluation and disease.

The evaluations of the level of diseases were done using a 10% regular sampling of the plot’s stocks. All evaluations w.r.t. downy mildew consisted in counting the number of infected leaves per stock. For powdery mildew, the observations were done on a sub sample of leaves or bunches, taken from the stocks of the sample: (i) in the first evaluation, 4 leaves were chosen at the shoot base; (ii) in the second evaluation, 6 leaves were sampled in the fruiting zone; (iii) in the third evaluation, 5 bunches per stock were observed. For each disease three classes of contamination were built (thresholds given in Table 6.1.)

The decisions and actions are compiled in a matrix M_e with the decisions (i.e. treatment requests) and actions (i.e. treatments and evaluations) in columns and the vintage/plot individuals in rows. The matrix data are the date of the Decisions/Actions (D/A) expressed in day count since January the 1st (day cardinality). Each disease is individuated for treatment requests and treatments. The columns are ordered according to the sequence of evaluations and stages given by the guidelines (see x-axis in figure 6.6a). In order to further study the time lags in the decision process, we derive the matrix $M_{e,relative}$ from M_e , as the relative time interval between the relevant D/A (i.e. between two columns).

Criteria for crop protection performance analysis *oeGrapeMilDeWS'* performances are estimated through three criteria:

- severity at harvest time: (i) severity of the powdery mildew epidemic on bunches and (ii) for both diseases, severity on the leaves.

- production level of the plot
- maturity of the berries at harvest (probable alcoholic content, total acidity) estimated on a sample of 200 berries per plot.

oeGrapeMilDeWS is considered to have provided a satisfactory crop protection if the latter two criteria are within the RDO's requirements, guarantying that the product keeps its quality label. As for the first criterion, crop protection is satisfactory if less than 5% severity is found on the bunches.

Note that, for both years, each plot was cut in halves (with the exception of V.O. CS in 2005). This was to assess, at a given time, the need and efficiency of an optional treatment and thus evaluate the level of the decision thresholds. At the end of both seasons, no statistical difference between the 2 half-plots was ever found. This allowed to choose the thresholds that led to the lowest number of treatments. Only the results with lowest number of treatment are presented in section 6.4.3.1.

6.4.2.2 Running Simulations of the *GrapeMilDeWS* elicited model

In a second step, this section will consider *GrapeMilDeWS* w.r.t. actual decisions made during the experiments. We examine hereafter if the elicited Statechart model, *GrapeMilDeWS*, could be used by someone else than its designers (i.e. the phytopathologist experts who also experimented it). The hypothesis is tested through a comparison of output decisions of the simulated model and actual decisions made during the field experiments.

Using the same input data, we compared the output of the simulated model against that of the experiments in the sense of decisions made and actions performed during the season. In no way did we attempt to estimate by simulation the crop protection quality that could have been achieved had we used the elicited model. That hypothetical goal would require a yield loss function for the combined powdery and downy mildews. Our expertise based approach is justified because such function is yet out of reach. Comparisons include each couple

$$Expe(plot, vintage) \text{ vs. } Sim(plot, vintage).$$

The aim is twofold. By comparing the output of each modalities of experimented *oeGrapeMilDeWS* (both TRF and ANF are considered) to the simulated *GrapeMilDeWS*, we can assess the fitness of the model to the experiments. Then looking deeper in the sequences, we identify and interpret temporal discrepancies or even contradictions in the reasoning logic which may either come from errors in the experiments or miss-modelling.

To do, so we need to go through the following steps. First, the data sources are to be identified (section 6.4.2.2). Then, scenarios are built to run the *GrapeMilDeWS* simulator (section 6.4.2.2). Finally, the output sequences of D/A from simulation are compared to those from the experiments (section 6.4.3.2). The comparison methodology is presented in section 6.4.2.2).

Data sources In order to compare simulations and experimental outputs, simulations require input data which are consistent with the experimental conditions.

The required data for the simulation input files, throughout the whole crop protection season (May 1st to mid August), are the disease level variables, the local downy mildew information, the rain forecasts, the phenological development.

The field evaluation records provide the dates and diseases levels used to build the update scenarios for variables M, O and Og.

The values for the ILM variable are interpreted from the plant protection service advisory bulletins. From the beginning of the season up to flowering (BBCH 10 to 65)^d, ILM turns positive at the first sighting of downy mildew symptoms. After flowering, it follows the risk assessment level of the plant protection service: recommendations to tighten the protection are interpreted as '+' and recommendations to wait before renewing treatment as '0'.

The triggering events for downy mildew treatments are not rainfalls but rain forecasts. However, during the experiment, not all rain forecasts events were considered significant. e.g. when the contamination risk associated to a rain event was considered low, on the basis of the meteorological bulletin, the event was discarded. The rules for building the simulator's input files will be presented in the next section.

The phenological development of the plots conditions the triggers for the first evaluation "E1", the third treatment "T3" and the last treatment "T6". Yet, the experts made a choice to have phenology loosely evaluated as precise evaluations are highly costly. Even though there are models to estimate the phenological stage of Grapevine (Garcia de Cortazar, 2006), we were not able to find the "function" used by the experts when they "loosely estimated" phenology. Therefore, we used the experts estimates, found in the TRF to build each plot vintage phenological scenario.

In section 6.4.2.1 we considered for the evaluation of performances only the halved plots with less treatments. When considering the fitness of the simulations of GrapeMilDeWS' model to its experimental counterpart, we have compared, for a given plot and year, the simulation run with both experimental half plot modalities. We meant to check if the simulation laid between the modality with minimum number of treatments and the one with maximum number of treatments.

Setting up simulations We have defined, above, the input scenarios as a succession of climatic, phenological and epidemic data. The following section details how these input scenarios are interpreted by the simulator to emulate the communication patterns between GrapeMilDeWS and its environment. The communication of variable values is triggered by events. The simulation time step is of one day.

Appropriate events are generated when ILM changes.

The case of rain forecasts is more complex, as the rain forecast records on the TRF are quite vague. Rain forecast events are sent daily to the simulator from the date of the initial forecast until the rainfall date, or, if that information was not recorded on the TRF, for three consecutive days past the initial forecast.

The only available data for diseases scenarios consist in the values (M, O and Og) at each evaluation date. As we cannot model the evolution of the disease accurately, we consider that whenever an evaluation is ordered, the value input into GrapeMilDeWS' simulator is the value from the experiment recorded at the same evaluation state, regardless of their respective calendar date. Consistently, phenology is fed into the system when significant information is available, either because a precise estimate of the phenology was recorded on the TRF, or because an action depending on a phenological stage

d. BBCH is a universal growth stages scale of mono and dicotyledonous plants. The adaptation to *Vitis vinifera* is due to Lorenz et al. (1995).

has been carried out. In that latter case, we inferred the phenology from the action. For example, if E1 was done on May the 4th then phenology “must have been” 15 on that day, as E1 is planned at $[BBCH \geq 15]$ (i.e. more than five leaves on the shoots).

The active period (AP) of the fungicides is used in the simulator, to drive many decisions for the timing of the application and in some cases to spare optional treatments.

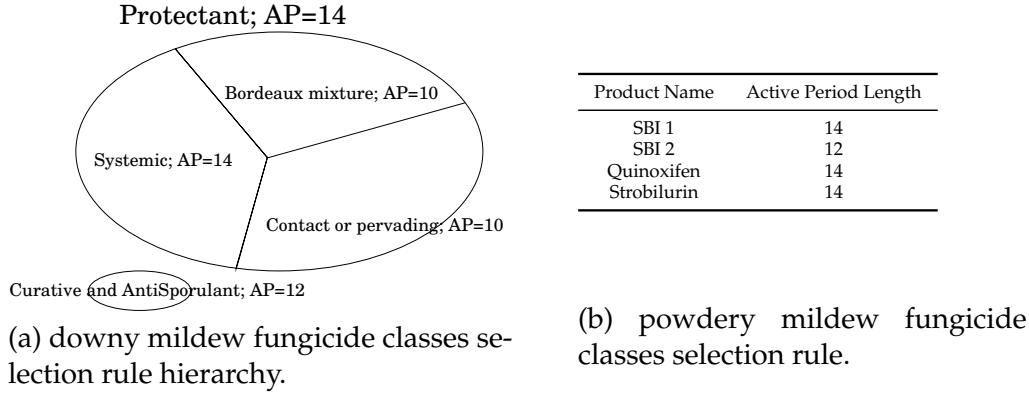


Figure 6.3: Fungicide classes and associated active periods (AP) as modeled in GrapeMilDeWS

The following configuration parameters were used in all simulations: (i) the assessment of the distance from/to an event has a close/far threshold set to 3 (days); (ii) the active periods are presented in figure 6.3; (iii) the post treatment restricted entry interval (REI) is set to 1 (day); and (iv) the delay during which the “plot will soon be unprotected” before the end of the active period, is set to 3.

Simulation results are sequences of decisions and actions. We represent these sequences in a dataset M_s with the same format as M_e presented on page 165. Similarly, we derive $M_{s,relative}$ from M_s in the same way $M_{e,relative}$ was derived from M_e .

Study of the decision/action similarities between experimental and simulated sequences
The comparison is based on the two matrices (M_e and M_s). We compute the new matrix $M_{e-s} = M_e - M_s$.

The *total mismatches* are the cells $M_{e-s}(i, j)$ defined as: $|M_e(i, j) - M_s(i, j)| \geq 100$. Indeed, the crop protection season in our Bordeaux area starts usually early May (day card. is 122). If a D/A (Decision/Action) does not exist (cell value for no D/A is 0), the absolute difference will be over 100. The *perfect fits*, on the opposite, are cells defined as: $|M_e(i, j) - M_s(i, j)| = 0$. Indeed, if the same value is present on both M_e and M_s the difference will be nil. Finally, *temporal discrepancies* are all the remaining cells from M_{e-s} with values in $] -100, 0[\cup] 0, 100[$.

With each of these three categories, we build the contingency table presented in figure 6.6(a).

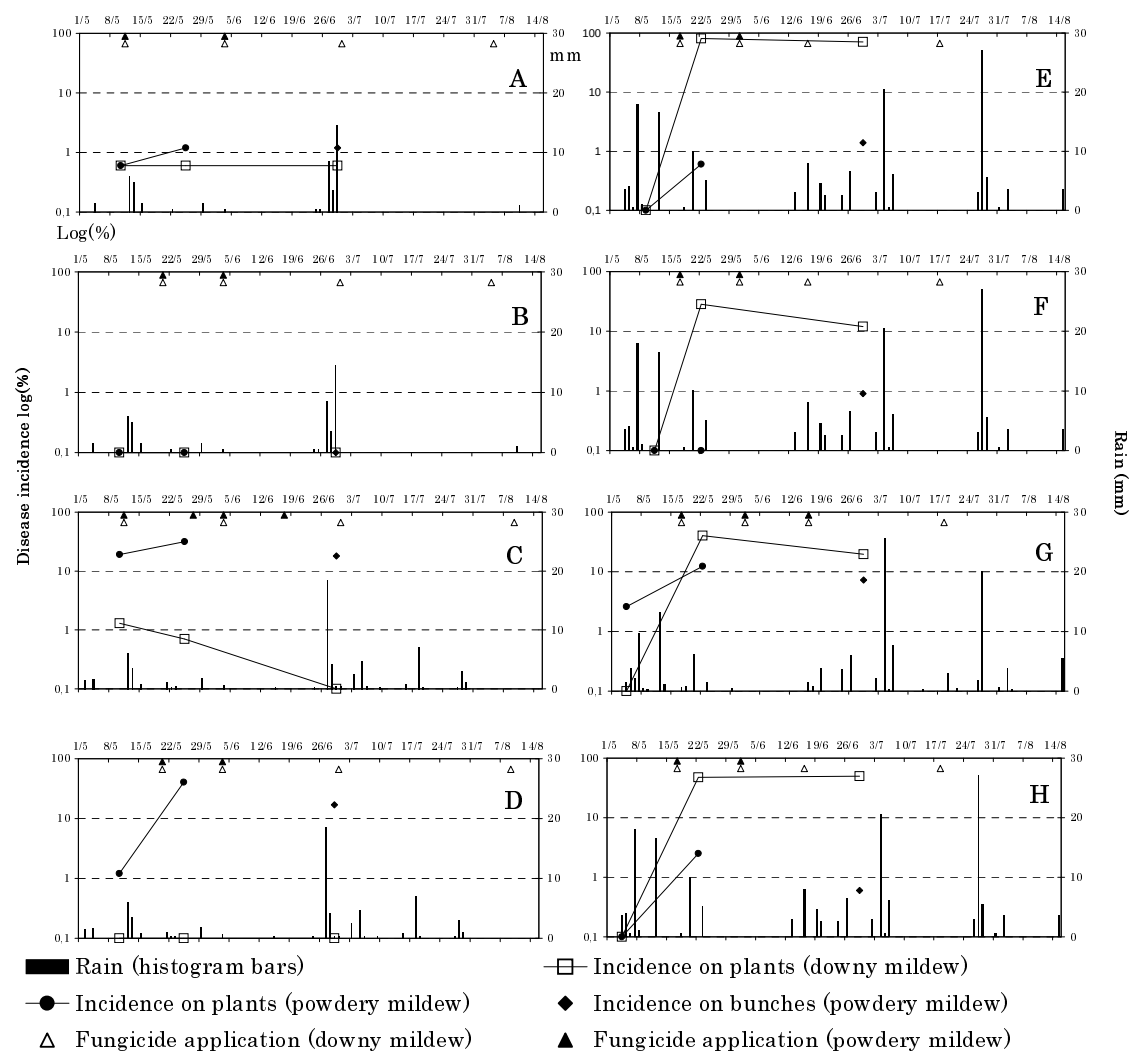


Figure 6.4: 2005 and 2006 crop protection seasons for each experimental plots, with on site precipitations, disease incidence at evaluation and treatment dates

6.4.3 Results

In this section, experimental results are first given. Then it is shown how the elicited model, once simulated, fits the experimental decision. The last part of this section forays in the detail of the decision making, comparing the timing of the decision from experiments with that of the simulations.

6.4.3.1 Performance obtained by experts experimenting *oeGrapeMilDeWS*

The main facts about crop protection in 2005 and 2006 for each of the 4 plots are given in figure 6.4.

2005

Analysis of crop protection in regard to powdery mildew. Concerning powdery mildew at Villenave d'Ornon, (figure 6.4 charts A and B) during the second evaluation (E2 on 25/5), no symptom was found on CS and only 0.6% of the stocks were attacked on merlot. Therefore only the two mandatory treatments were performed (resp.: 11/5 and 3/6 figure 6.4(A); 19/5 and 13/6 figure 6.4(B)). At Latresne, (figure 6.4(C)) 19% of the Merlot displayed powdery mildew symptoms after the first evaluation (E1 on 10/5) and after E2 the incidence reached 31% (25/5). Thus, in addition to the mandatory treatments, two optional ones were ordered during Stage_2 and Stage_4 (resp. 25/5 and 17/06)(Decision stages are presented on figure 6.1). On bunches, the incidence at the third evaluation (E3) was 18% (28/6). At the same site, on CS, 1.2% and 41% of the stocks were contaminated at E1 and E2 respectively. Thus only the two mandatory treatments were carried out on that plot.

Analysis of crop protection in regard to downy mildew. Only 3 symptoms of downy mildew, were found over all sites on Merlot at E1. No development of the disease was recorded during the next evaluation. Two optional treatments were applied, the first one upon discovery of the symptoms in conjunction with a rain forecast (11/5 on M. and 19/5 on CS). The second optional treatment (applied at Stage_5 on 30/6) should not have been done as no increase in the attacked stocks frequency was witnessed. That application was decided by the experimental unit, because its managers considered the risks to be too high after a heavy precipitation event.

Overall quality At harvest, the estimated level of diseases on the leaves and bunches were very low (see table 6.2). The measured yield was above the authorized quota of the respective RDOs. The estimated alcoholic content, and total acidity were above RDO's requirements, thus compatible with the production of Bordeaux quality wine. Therefore the production objectives were met and the crop protection provided by *oeGrapeMilDeWS* was considered satisfactory.

2006

Analysis of crop protection in regard to powdery mildew. No symptom of powdery mildew was observed at E1 on 3 out of 4 plots (2 at Villenave d'Ornon and CS at Latresne i.e. figure 6.4(E,F,H)). E2 having shown less than 20% of attacked stocks, and E3 less than 20% of the bunches, only the two mandatory treatments were carried out on these three plots. On the fourth plot (see figure 6.4(G)), 2.6% of the stocks were attacked at E1, 12.4% at E2 and 7.3% of the bunches showed powdery mildew symptoms at E3. The optional treatment T4 was thus carried out (16/6), whereas T5 could be spared as the situation seemed to have improved at E3 (29/6).

Analysis of crop protection in regard to downy mildew. No symptom of downy mildew was observed at E1. An optional treatment (T1) was nevertheless carried out (coupled with a mandatory powdery mildew treatment on 17/5), following the discovery of spots on some other plots in the vineyard estate (ILM turned to '+'). The application was carried out before a forecasted rainfall. This same treatment was done at all sites, 5 days before E2 (22/5). At E2, high levels of downy mildew were found at all sites: from 28 to

81% of attacked stocks depending on the plot. No optional treatment T2 was done as the vineyards were protected by T1. High levels of downy mildew at E2 mechanically implied application of an optional treatment T4 on all sites (16/6), in addition to T3 (31/5 at V.O. and 1/6 at Lat.). The mandatory treatment T6 was carried out between the 16th and the 18th of July. It was anticipated upon request of the vineyard management.

Overall quality The alteration of harvest due to the downy mildew was limited (less than 5% severity) and did not impact on yield below the production quotas authorized by the RDO. The foliage was affected by the downy mildew, mainly on the site of Villenave d'Ornon where defoliations were observed. Nevertheless, these defoliations were late and the potential degrees obtained largely higher than the minima authorized in the Registered Designation of Origin concerned.

Year	Site	Cultivar	Disease	Nb of fungicide application	Disease severity at harvest (%)		Défoliation (%)	Yield (hl/ha)	Harvest quality	
					bunches	leaves			Probable alcohol degree (% vol)	Acidity (gH2SO4/l)
2005	V.O.	M	Dm	4	0	0	0	62	13.3	3.7
			Pm	2	0.01	-				
	V.O.	CS	Dm	4	0	0	0	53	12.6	3.8
			Pm	2	0	-				
	Lat.	M	Dm	4	0	0	0	66	13.1	3.8
			Pm	4	0.53	-				
	Lat.	CS	Dm	4	0	0	0	71	12.4	4.5
			Pm	2	0.66	-				
2006	V.O.	M	Dm	4	4.0	28.0	9.3	52	12.6	3.8
			Pm	2	0.1	20.0				
	V.O.	CS	Dm	4		25.0	15.0	46	11.8	5.0
			Pm	2	<0.1	-				
	Lat.	M	Dm	4	1.2	6.3	0.6	62	13.9	4.6
			Pm	3	0.4	21.9				
	Lat.	CS	Dm	4	0.6	7.0	1.0	59	12.4	5.3
			Pm	2	<0.1	-				
Dm : Downy mildew				V.O. : Villenave d'Ornon				M : Merlot		
Pm : Powdery mildew				Lat. : Latresne				CS : Cabernet sauvignon		

Table 6.2: Quality results at harvest. The number of fungicide treatments corresponds to the minimal application half plots.

*Conclusion of the experiments: Overall quality of the *oeGrapeMilDeWS* decision workflow* On these two first years of experiments, we have shown that *oeGrapeMilDeWS* was compatible with grape and wine production standards. All plot yields were above the RDO target yield: 45 and 50 hl/ha in Pessac Léognan and 1^{ère} côtes de Bordeaux respectively. The probable alcoholic degrees are also above the requirement: 10 and 10.5 alcoholic degrees respectively, as shown on table 6.2. More important, these results were achieved with only 2 to 3 powdery mildew treatments and 4 downy mildew treatments. These figures could have been even lower as unjustified extra treatments were applied by the vineyard management.

With the data from the evaluations, the experts have been able to decide whether to apply or skip a number of applications. It was shown above that the experts implement-

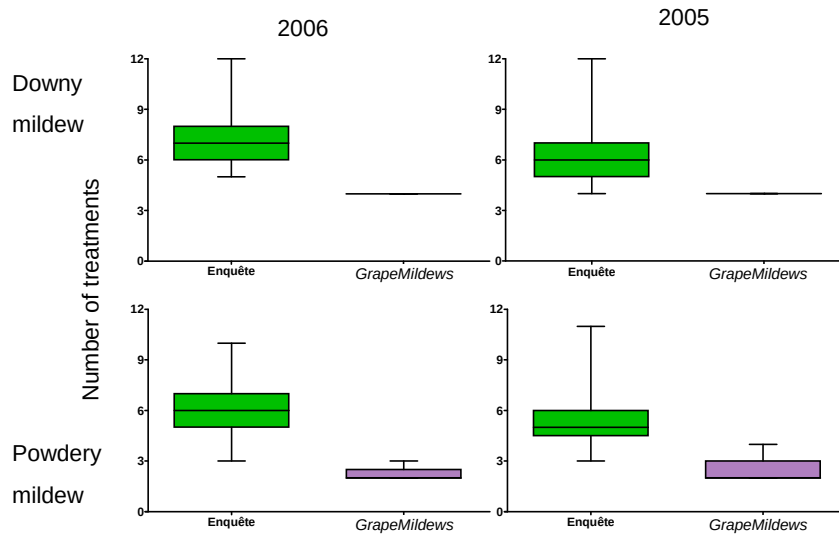


Figure 6.5: Number of treatments applied with *oeGrapeMilDeWS* compared to the declared number of treatments made in the Bordeaux region, during the years 2005 and 2006 for both powdery mildew and downy mildew. Sample size for the common practices: 103 vine growers from four Bordeaux RDO's (Source: unpublished survey for the ANR project "ADD Vin et Environnement Durable", Bordeaux, INRA/Santé Végétale, 2006. See ann. A).

ing *oeGrapeMilDeWS* achieved the crop protections goals. In all cases the production satisfied the RDO requirements and less than 5% severities were measured regarding each disease. Similar results were obtained during the 2007 campaign which in France was characterized by a heavy downy mildew epidemic. Unfortunately, the data were not available at the date this paper was written.

In all cases: 2005, 2006 (and 2007), the number of treatments was reduced to about half the median number of treatments done in the Bordeaux region (see figure 6.5). Note that the number of treatments recommended by *oeGrapeMilDeWS* is not absolutely lower than the lowest examples in the sampled population of vine growers. That is consistent with our objectives, to propose an IPM inspired crop protection strategy that reduces the number of treatments and yet keeps yield loss risks at an *acceptable level*.

6.4.3.2 Analysis of the similarity of the experimental and simulated decision workflows

The objective of comparing D/A sequences from *GrapeMilDeWS* and its expert counterpart *oeGrapeMilDeWS* is to assess the fitness between the experts' behaviour when implementing *in vivo* *oeGrapeMilDeWS* and the behaviour induced from the elicited specifications of such crop protection decision workflow (i.e. *GrapeMilDeWS*). The comparison will highlight two effects: quality of the modelling and conformity of the expert experimental behaviour to the decision workflow they described.

We will first look at the number of treatments requested in each of the simulations and experiments sequences. Then we study the fitness of *GrapeMilDeWS*' behaviour to *oeGrapeMilDeWS*' outputs. Fitness is analysed according to two dimensions: similarity and timing of the D/A. In a second subsection, the distributions of time intervals between

a couple of D/A are studied and explained for both the experiments and the simulations.

Number of treatments In GrapeMilDeWS, the sum of treatments against both targeted diseases, can vary between 4 and 11. Table 6.3 shows that the two years experiment we have carried out stand in between (minima and maxima averages are 6.4 and 7.4). The simulations led to similar number of treatments: 6.6 treatments per plot on average. These satisfying simulation results stand between the experiments minima and maxima.

plot vintage	Nbr of Treatments		
	Sim	minima Expe	maxima Expe
2005 Lat. CS	7	6	7
2005 Lat. M	7	8	9
2005 V.O. CS	7	6	
2005 V.O. M	5	6	7
2006 Lat. CS	6	6	7
2006 Lat. M	7	7	8
2006 V.O. CS	7	6	7
2006 V.O. M	7	6	7

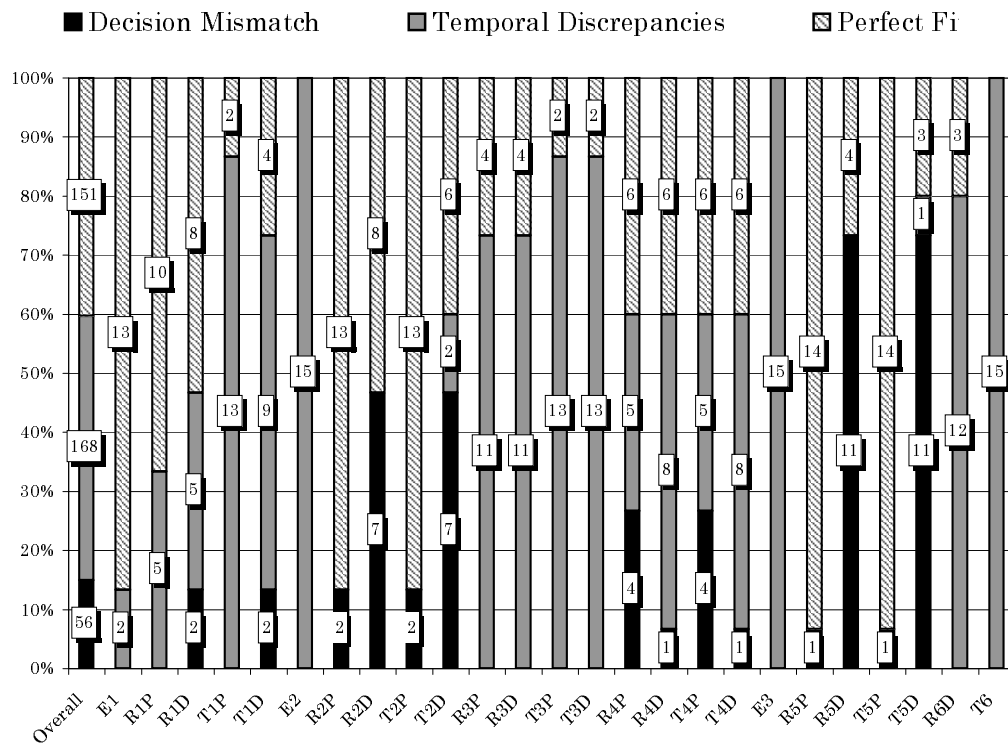
Table 6.3: Number of treatments per plot-vintage. Sim for simulation results; minima Expe for the half-plot-vintage with minimum number of treatments (idem Tab.6.2); maxima Expe for the second half with one more treatment.

Similarities of the Decision/Action dates between experimental and simulated workflows Thanks to the difference matrix M_{e-s} (presented in section 6.4.2.2), we check the way the simulations fit the experiments. When $M_{e-s}(i, j) = 0$, we have “perfect fit”: there is less than one day difference between simulation and experiment dates.

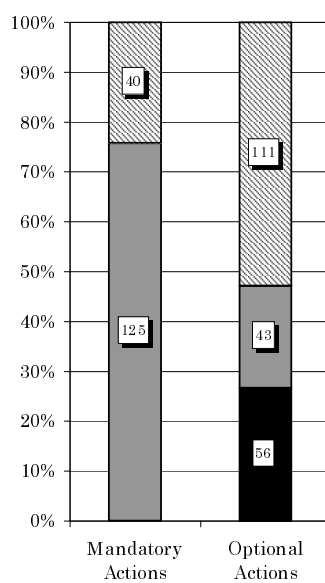
Figure 6.6 presents the contingency tables from M_{e-s} , of perfect fits, temporal discrepancies and mismatches. Each column accounts for one action or decision. Overall, as shown on figure 6.6(a), there are 14.9% complete mismatches and 40.3% perfect fits. Figure 6.6(b) and (c) show that there are more perfect fits with the optional actions than with the mandatory ones (10.6% vs. 29.6% overall D/A). This satisfactory result is explained by the fact that “non occurrence” of a D/A on both the experiment and the simulation is a perfect fit. Yet, when D/As are absent there can only be perfect fits or complete mismatches, but on first approach we consider both perfect fits and temporal discrepancies as satisfactory.

Decisions regarding powdery mildew led to fewer errors than those concerning downy mildew (figure 6.6(c)). In table 6.4, it can be seen that complete mismatch occur for T2D and T5D for a number of plots while simulation is very close to experiment for T2P and T5P. For T2P, differences can be related to processing of rain forecasts, and cancelling of late T2D in anticipation of stage 3 in the experiments. For T5D, it happens that experts decided an extra-treatment which should not have occurred.

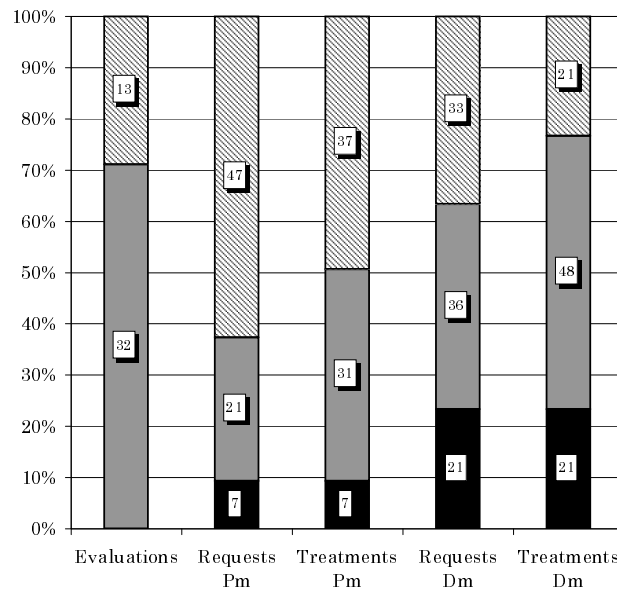
Figure 6.7 summarizes the distributions of the temporal discrepancies, viewed through the Tuckey quartile box plot representation. We used the R statistics software (R-Development-Core-Team, 2008) to generate all box and whiskers figures.



(a) Overall and Detailed view: each decision and actions are evaluated



(b) Mandatory Vs Optional Decisions



(c) By Action Type

E for Evaluations R for treatment Requests T for Treatment applications
 {1 : 6} refers to the Stage at which the decision for such action is taken
 {P, D} the target disease: P for powdery mildew and D for downy mildew

Figure 6.6: Proportions of perfect fits, temporal discrepancies and complete mismatches between the Experimental and Simulated GrapeMilDeWS. Labels represent the number of cases in each category.

Optional Treatment name	Sim		minima Expe		maxima Expe	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006
T1D	4	2	4	2	3	4
T2P	0	0	1	0	1	0
T2D	3	2	0	2	0	0
T4P	2	2	1	1	3	1
T4D	1	4	0	4	0	4
T5P	0	1	0	0	1	0
T5D	0	0	4	0	3	4

Table 6.4: Distribution of optional treatments over all plots per vintage, treatment and GrapeMilDeWS implementation type: Sim. for simulation results; minima Expe. for the half-plot-vintage with minimum number of treatments over the season (idem Tab.6.2); maxima Expe. for the second half with more treatments.

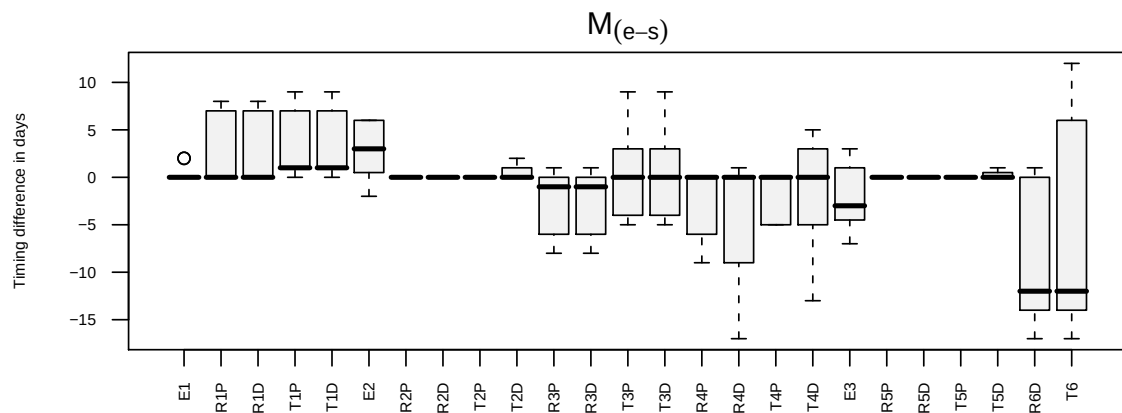


Figure 6.7: Tuckey quartile box plot of time differences from $M_{(e-s)} = M_e(i, j) - M_s(i, j)$ for each action or each decision

With this view, the directions of the discrepancies are clearly visible. Values in $M_{(e-s)}$ are positive when the simulator acted earlier than was recorded in the experiment, for example E2 was done on May 25th (day 145) in the experiment and yet “done” on May 19th (day 139) with the simulator; and vice versa the difference is negative when the simulator was “late”.

The last two boxes, on figure 6.7, concern the last treatment T6. Their high values are artefacts caused by the early application of the downy mildew treatment in 2006 on the initiative of the vineyard manager (see section 6.4.2.1). Once these artefacts have been excluded, it clearly appears that, whatever the decision, the time gap between experiments and simulations is stable. The average is -0.25 day over the whole season. This comforts the idea that no lag is accumulated in the process. Indeed, the simulation scenarios for phenology, taken from the experiment, had a resynchronisation effect which prevented temporal discrepancies to accumulate unduly between simulation and experiments.

Overall 84% of the decisions are identical between the simulator’s and the experts’. Considering the fact that the model was purely declarative, that we did not exclude the experimental artefacts, we are satisfied with the quality of the model in its ability to make the same decisions as the experts. Yet 53.9% of these correct decisions are made

at with a timing error. However, once the T6 artefacts have been removed, the average discrepancy is less than one day (“perfect fit” included).

6.4.3.3 Analysis of the Decision/Action sequences in experiment and simulations

The behaviour of *GrapeMilDeWS* is analysed hereunder. Reasons for some of the major temporal discrepancies are given, and some patterns in the executions of the experiments over the set of 4 plots are identified, in order to exhibit potential modelling problems. We will proceed in two steps, first looking at the whole sequences of decisions and actions and secondly, analysing the time interval between couples of D/A.

Figure 6.8 is given for reference as raw data. We will use figures 6.9 and 6.10 to support our analysis over these data.

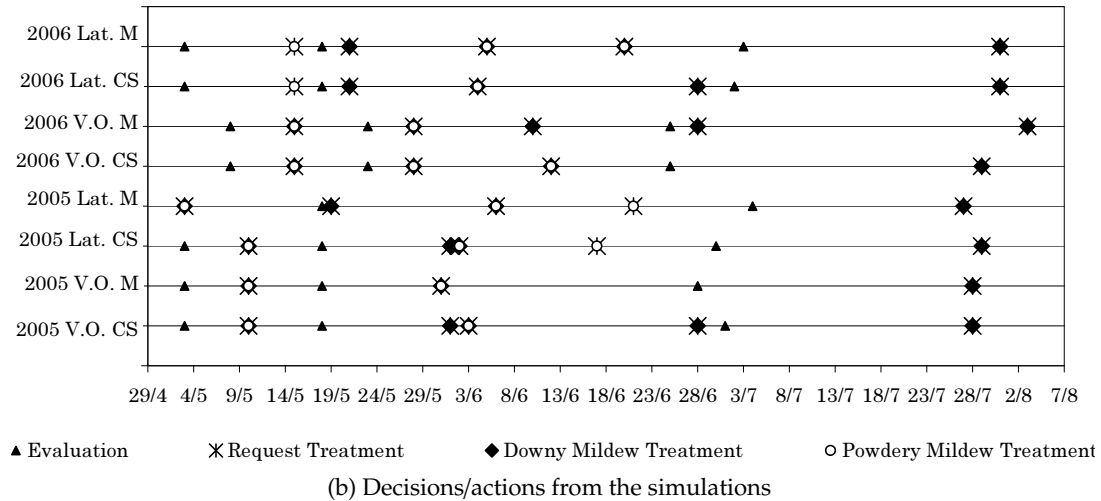
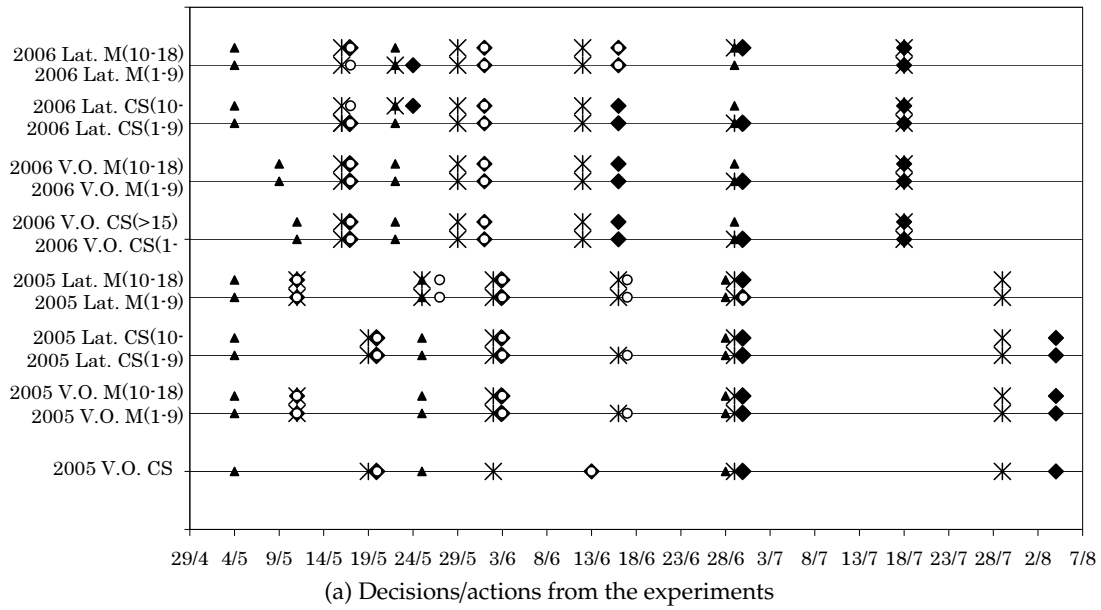


Figure 6.8: Sequences of decisions and actions for each (half) plot and year. (symbols may overlap if decisions are taken on the same day)

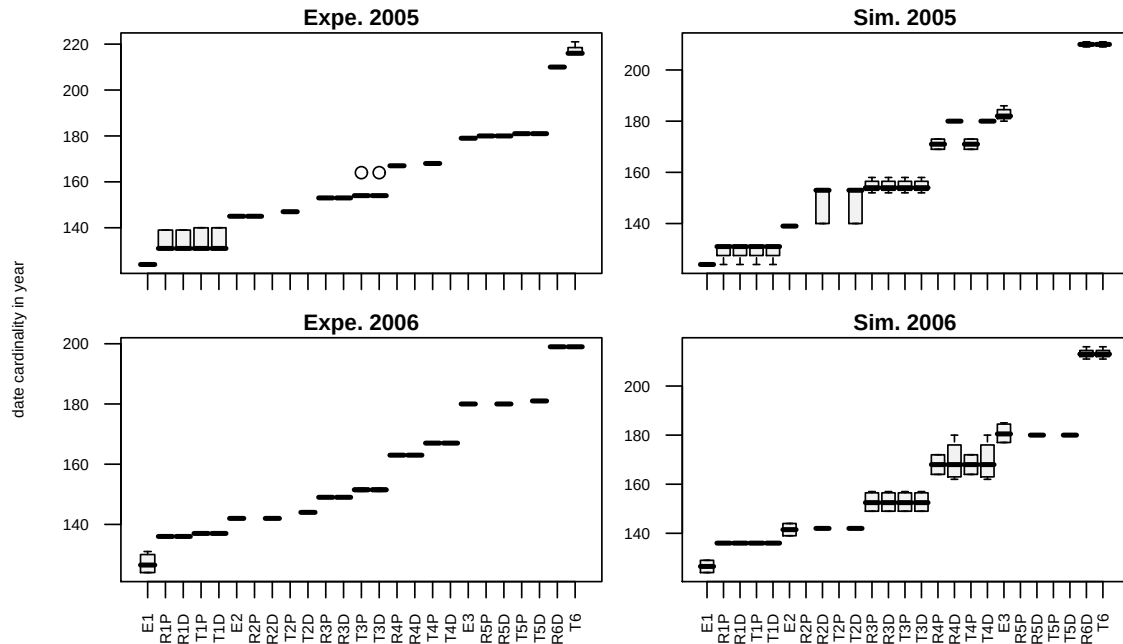


Figure 6.9: Temporal distributions of Experiments and Simulations, decisions/actions for all vintages. Zero excluded (non decisions are not presented here)

Sequences of decisions and actions Simulations (figure 6.8(b)) are synchronised at the beginning of the season with the first evaluations of the experiment (figure 6.8(a)) based on the experts assessment of phenology. The phenological stage conditions also ensure synchrony between the experiments and the simulations at Stage_3 and Stage_6's entry.

However, at first glance, figure 6.8 shows quite different patterns in the sequences. Even though both decisions systems were “initialised” between May 4th and May 11th, there is clearly more synchronicity between plots in the experiments sequences (a) than in the simulation ones (b).

Figure 6.9, which gives the temporal distributions of each D/A is another illustration of this point. For instance, in 2006, all experimental decisions were made on the same day for all plots whereas the simulations display some variability. The experts seem to have executed the *oeGrapeMilDeWS* process simultaneously for their four plots whereas the simulations led to decisions that were totally independent one from the other.

Indeed each simulation of a plot-vintage couple was a separate execution of the simulator. The simulator has no operational constraints, therefore all decisions were executed on the exact same day any order was issued; whereas the experts could not abstract themselves from the operational constraints of the vineyard management the way the simulator can.

time intervals The next section exposes how synchrony of the experts' decisions was achieved. We analyse the distributions of $M_{s,relative}$ and $M_{e,relative}$, identifying time constraints that were broken and those that were respected.

Both diagrams on figure 6.10, display relative times between pairs of events, from $M_{s,relative}$ and $M_{e,relative}$ respectively. Working with relative time intervals allows us to check constraints such as “does $E2 - E1 = 15$?” (i.e. is the 15 days rule between evaluation 1 and

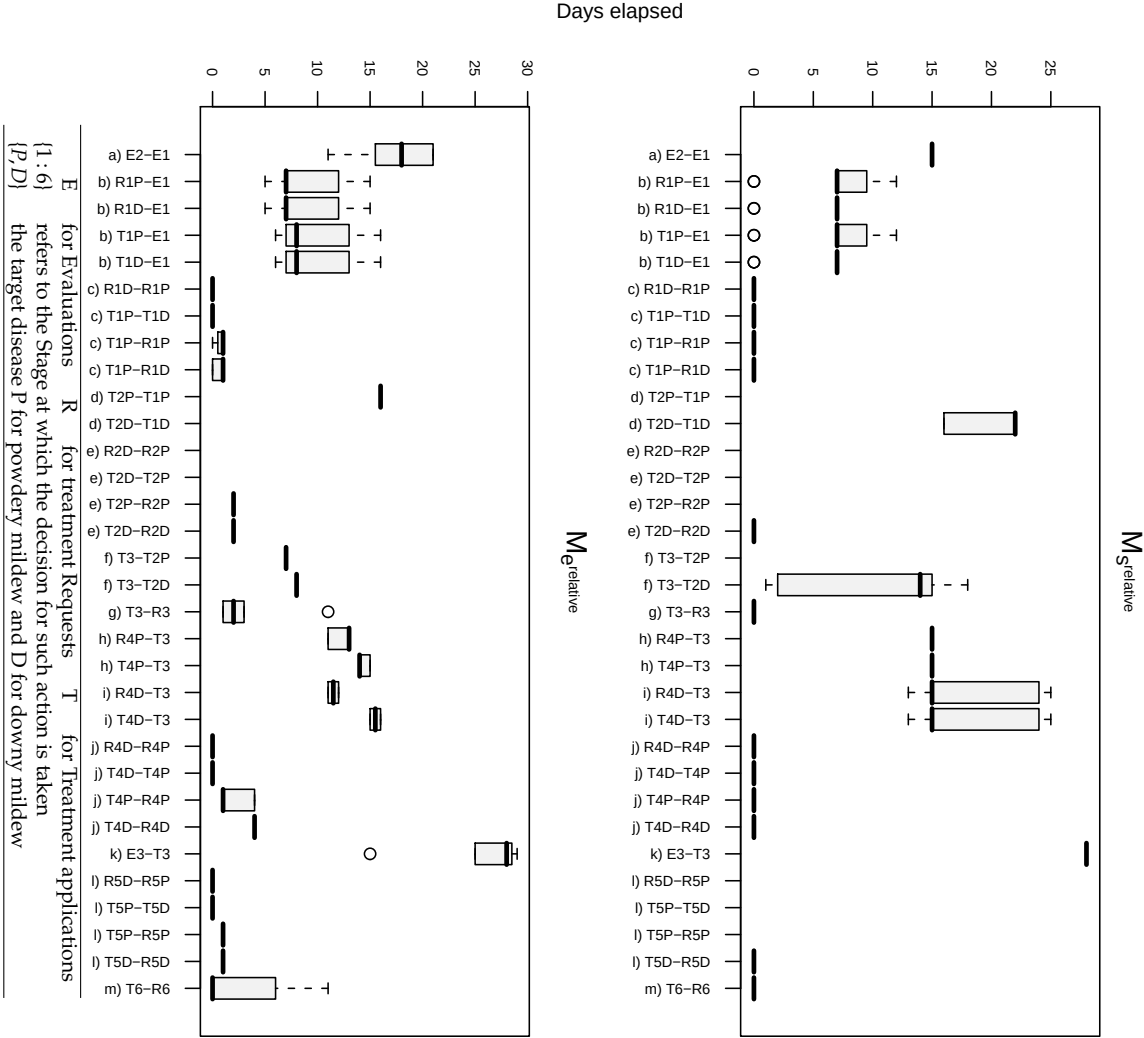


Figure 6.10: Tuckey Box plot for the relative differences between pairs of D/A. From bottom to top, experiment ($M_{g\text{relative}}$) and simulation distributions ($M_{g\text{relative}}$). The Y-axis represents days elapsed between two D/A. N.B. Dots represent outliers and whiskers are not significant due to sample size

evaluation 2 respected? See figure 6.1). Time intervals also permit to control if powdery mildew treatments and downy mildew treatments have been separated (ex. T1P-T1D). Finally, they also measure the lag between the decision and the execution (ex. T6-R6).

Note that many values have had to be excluded as they contained missing events in one term of the difference and would have artificially created high values. As we are working with few data, the box plot should be interpreted as intervals of variations rather than a summary of some theoretic distributions.

The points that have been studied on figure 6.10 are explicited below. Each item of the list (c,e,g,j,l,m) is about time lag between decision and the actual corresponding action (spraying) within a stage, which we will call *spraying delay*. The second list (a,b,d,f,h,i,k) is about inter-stage conformance to temporal constraints.

c) Spraying delays at Stage_1.

The delay between the decision and its execution in the experiments was never longer than 1 day. It is also possible to test the disjunction of the optional downy mildew treatment from the mandatory powdery mildew treatment. The experiments and the simulations were consistent with applying joint treatment in all tested situations.

e) Spraying delays at Stage_2.

No mixed treatment was done. It was not observed any significant delay between request and application of a treatment.

g) Spraying delays at Stage_3.

In the experiment the delay spans from 1 day to 3 days with the exception of plot V.O. CS in 2005 which was treated 11 day after the request was sent out. In that later case, the treatment was requested at the same time as for other plots (June 2nd), but the experts requested that plot to be treated later, because its phenology was less advanced.

j) Spraying delays at Stage_4.

Only one plot in the experiment was treated with a delay above one day targeting powdery mildew, but all plots concerned by a downy mildew application were treated with a 4 day delay.

l) Spraying delays at Stage_5.

No disjunction between applications, no significant delay was observed.

m) Spraying delays at Stage_6.

The delay span from 0 to 11 days. Indeed the last mandatory treatment was done in urgency and with no delay in 2006 (see section 6.4.3.1)). On the other hand, the 2005 applications seem to have been greatly anticipated. For instance, plot Lat. M was treated 11 days after the order was sent and the other plots have been treated 6 days after the request.

We shall now study the inter-stage delays.

a) Time span between E1 and E2.

The simulations ($M_{srelative}$) strictly respects the Stage_1 exit condition, i.e. E2 was always carried out 15 days past E1. In the experiment ($M_{erelative}$), the length of E2-E1 varies between 11 days and 21 days. This seems due to a 'batch' implementation of the procedure: the experiments display total synchrony for all plots at E1 and

E2 in 2005 and a clear re-synchronisation of all plots at E2 in 2006. Consequently, no plot was evaluated at precisely 15 days interval.

- b) Time span between the first evaluation E1 and the request or the application of the first treatment.

The simulations' decisions were consistent with those from the experiments: generally 5 days between E1 and R1 and/or T1^e (see "c"). Rain and downy mildew symptoms detected in the region (i.e. ILM='+') triggered treatments T1D and T1P.

- d) Time span variability between T1 and T2.

There is no T2D in the experiments but the simulator results show a great heterogeneity in the timing of that application, from 16 days and up to 22 days. This denotes GrapeMilDeWS' flexibility. It can either provided "a perfect tilling protection" (the active period of T1 lasted 14 days) or have the treatments positioned just in time.

- f) Time lag between treatments at Stage_2 and T3.

In the experiments, about one week (7, 8 days) separates T2 (P and/or D) from T3 (P and D, mandatory), whereas the simulations exhibit a large variability: between 1 and 18 days. The reason for such variability is to be found in the simulator ordering "two treatments on downy mildew, two days in a row". The first at Stage_2 the second at Stage_3 (see section 6.4.3.4)

- h) Time span between the application of T3 and the request or treatment against *powdery mildew* at Stage_4.

The simulations, enforced the "one active period" constraint between the treatments made at stage_3 and the entry into Stage_4: 15 days between T3 and R4P. Considering the experimental results, the 4th treatment request was anticipated (with as little as only 11 days between T3 and R4P). The request was issued while still in Stage_3. However, the treatments were carried out in Stage_4: there was never less than 14 days between T3 and T4P in the experiments.

- i) Time span between the application of T3 and the request or treatment against *downy mildew* at Stage_4.

This treatment was applied solely in the 2006 experiments. The request was *anticipated*. For simulations, the delays span from 13 to 25 days. The shortest delay was due to a curative fungicide selected at T3 (12 days AP). The longest delay: 25 days, is explained by a moderate downy mildew risk situation where a rain forecast was awaited and which eventually triggered the treatment request.

- k) Time span between T3 and the third evaluation.

The GrapeMilDeWS model states that E3 should be done 28 days after T3 (i.e. about two active periods later). In the experiments, the delays between T3 and E3 span from 15 to 29 days. In 2005, the delay was of 25 days with the exception of V.O. CS which only has a 15 day delay because it was treated later than the other plots against T3 (i.e. the outlying point at tick 'k' on figure 6.10 chart $M_{relative}$). The expert resynchronised this plot with the other by shortening the E3 – T3 delay to 15 days for that plot.

e. any request and/or any treatment at Stage_1.

6.4.3.4 Discussion about the causes of discrepancies between experiments and simulations

Overall our analysis of the results from the previous section points out three phenomena: (i) The batch mode management of the experiments, (ii) anticipations and (iii) existence of artefacts from both the experiments and the simulations.

The batch mode management: synchronisation of the experiments' actions Our understanding is that the experts have taken into account operational constraints. With figure 6.9 it clearly appears that experimental decisions and actions for all four plots were made at the same time and similarly, carried out in synchrony. Although the decisions may be different i.e. not all plot will be treated, all those that will, will be treated at the same time.

Anticipations As shown above, the experts have a tendency to synchronise the decisions on all four plots. This is carried out by anticipating the decision making for the plots that are late (see k E3-T3 on page 180). Yet synchronisation was not the only reason for anticipations. It seems that the expert anticipated some decisions because they could foresee the future necessary actions (see "h" on page 179). For instance, as soon as T3 was done, it was possible to make most Stage_4's decisions regarding which treatments would be necessary. Note that only ILM may be updated at Stage_4, yet it is not always involved in the decision making (see Part.1 section 4.8 Léger et al., 2008a). This anticipation capacity is not provided by GrapeMilDeWS' statechart. As a reactive system modelling language, Statechart is ill equipped to program such introspective behaviour.

Artefacts The detailed analysis of the results below points out a few artefacts both in the experiments and the simulations.

Under certain conditions, the simulator could recommend to have two treatments applications done in less than two days. On both CS plots in 2005 (see figure 6.8(b)) the second treatment was done between June 1st and June 3rd, date of the third treatment (day 153 to 155)). GrapeMilDeWS' statechart "could not foresee" the upcoming realisation of the stage_3 entry condition.

Nevertheless, under more realistic conditions, the above scenario should not happen. Indeed, there is a security mechanism against late treatment at that stage^f. This mechanism could not have worked in the simulations as we used partial phenological data which are not continuous.

The frequency of such unwanted sequences would need to be evaluated. Yet under realistic conditions, which would be the case if GrapeMilDeWS was used embedded in a decision support system (DSS), we feel confident about the fact that the above combinations would be rare.

We do not consider as an artefact the non-respect of temporal constraint in the experiments caused by the batch mode synchronisations or by anticipations. However, we identified as an experimental artefact the application of treatments at Stage_5 in 2005, which could not be justified according to GrapeMilDeWS principles. Similarly,

f. When Stage_2 is active and no T2D was carried out and ILM is '+' then Stage_3 should be entered at the very beginning of flowering instead of waiting until mid flowering (BBCH 60 and 65 respectively).

the early Stage_6 treatments applied in 2006 were considered as artefacts. Indeed, they were decided by the vineyard management who feared epidemic development in July because the previous downy mildew treatment had been done at least one month before. confronted with forecasts of heavy rainstorms, it was not possible to convince these operational managers, who are responsible for the economic output of the vineyard, not to act on what they felt was a highly risky position.

6.4.4 Discussion

The discussion is organised as follows. First, we study how knowledge has been leveraged by the experts to design GrapeMilDeWS. Second, we show how joining the management of both downy mildew and powdery mildew is an innovation. Third, we discuss the difficulties of monitoring. And finally, the acceptability of our crop protection strategy is discussed.

6.4.4.1 GrapeMilDeWS and expert knowledge

In this section, we show how GrapeMilDeWS' design efficiently takes advantage of the available epidemiological knowledge to protect the vineyard with less sprayings than common practices.

Against powdery mildew: the aim is to control the early stages of the epidemic and to break its dynamic before the exponential replication stage. This goal is achieved by assessing the existence of an epidemic in the plots when five leaves are unfolded (BBCH 15). The probability of not spotting *Erysiphe necator*'s primary infections this early in the season is quite important. Therefore, a 10% sampling rate is used, and immediate spraying action is taken above a threshold frequency of only 2% of the stocks infected. The second evaluation regarding powdery mildew aims at correcting an underestimation of the risk during the first evaluation.

Past the flowering period (T3), the yield loss risk induced by powdery mildew decreases rapidly. In our 2005 and 2006 experiments, during the cluster closure and ripening periods, no treatment was applied. This way of doing is very different from the common practices but gave, so far, satisfactory results. On that very point, the simulations seem to indicate that the formal model may be too conservative (see table 6.4) (i.e. the experts have been more daring in real life than when specifying the formal GrapeMilDeWS model during the elicitation).

Against downy mildew: a common heuristic to protect grapevine against *Plasmopara viticola*, in Bordeaux, is to make sure that the vines are protected before rainfall events. GrapeMilDeWS' principles are to take no chance when the epidemic is widely spread (see '+' thresholds on table 6.1) and monitor the rainfalls when the epidemic pressure is moderate. This is achieved by starting the crop protection when the first symptoms are spotted in the plot or if there is risk in the vicinity (ILM='+'), and then to renew the treatments when either the attack is fierce (i.e. M='++') or rain is forecasted. These are widespread principles against downy mildew (for example (CA11, 1999) or (Bleyer et al., 2007)).

The innovative aspects here, are much more methodological than epidemiologic. By giving the strategy an explicit form, we implement the common heuristic in a way that prevents GrapeMilDeWS' user to simply state the common heuristic (have the vineyard protected before rainfalls) and then implement it with a systematic two weeks renewal frequency under the justification that rainfalls are very frequent in Bordeaux. With this strategy, the application decision needs to be justified, "documented".

6.4.4.2 Managing two diseases in the same crop protection strategy

The common practice is to apply mixed fungicide treatments against powdery and downy mildew most often at a fixed renewal rate (10 to 15 days depending on the fungicides used). GrapeMilDeWS' approach combines the rational decision making against two pathogens which implies possible desynchronisation of the treatments.

By positioning two mandatory treatments for each target disease, including one targeting both, it ensures a minimal protection at key periods. The number of mandatory treatments could be theoretically lower, but GrapeMilDeWS would require extra monitoring to reach the same compromise between pest control and yield loss risks.

As the pathogens development conditions for powdery mildew and downy mildew differ, the expertise consisted in making the necessary arbitrations, setting priorities and taking into account the operational constraint of the vineyard management. Indeed, to be acceptable by growers, GrapeMilDeWS should avoid whenever possible disjoining the application of treatments if both are needed.

These arbitrations led to the stages structure. For instance Stage_4's logic is made so that there can be only one application, which implies that if upon entering that stage, a powdery mildew treatment alone was ordered, then it is a strategic choice not to have a second application against downy mildew whatever the upcoming conditions. These measured risks are acceptable at that period as downy mildew needs to be low for the sole powdery mildew application to be decided.

The counterpart from having the possibility to spare one or the other or both treatments all along the season (except at Stage_3), is that there must be re-synchronisation, from time to time, of powdery and downy mildew treatments, in order to keep the process manageable. Thus, some treatments may be renewed before the end of their active period. On the other hand, on years with moderate epidemics GrapeMilDeWS spares treatments.

The evolution of priorities during the season led the experts to the 7 stages architecture for their reasoning. That architecture in turn led us, when preparing the formalisation, to view the experts IPM crop protection solution as a decision workflow, where each stage follows an independent decision flow. Statechart became a good candidate for efficiently representing the whole system in a compact, yet coherent manner, although alternative process formalisms could be evaluated to represent decision workflows (Activitychart, (Eshuis and Wieringa, 2002) or Petri nets (van der Aalst et al., 1994), among others).

6.4.4.3 The burning issue of monitoring

Monitoring is the heart of the decision workflow. It implies acceptance to live with the disease and control it. Yet, evaluations are very costly. This is the reason why they

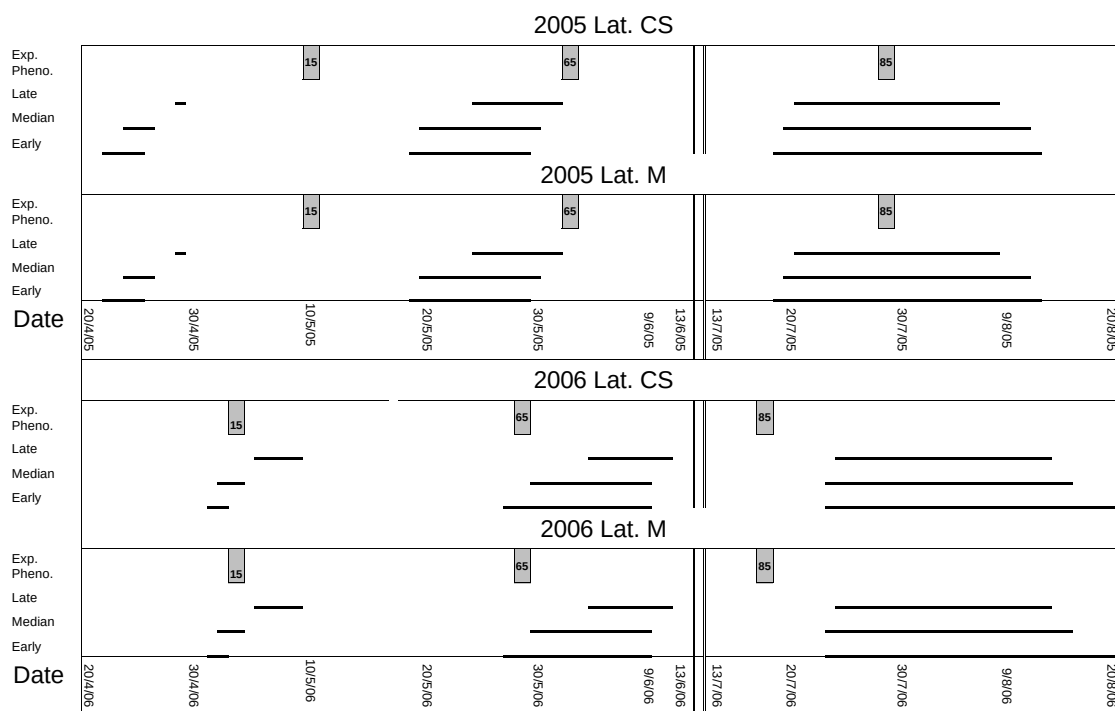


Figure 6.11: Comparison of experts' phenological stage estimates in 2005 and 2006 Vs three, sum of daily avg. temp. $\geq 10^{\circ}\text{C}$ + Cultivar + Site, multi-linear regression models. Early was fitted over the early organs. Median represent central tendency half the plot organs are above a given stage, half are below, Late was fitted with most immature organs. With each models, we have represented the time duration of the following phenological stage intervals : [15,16]; [60,65]; [80,85]. In the gray boxes the expert phenological estimates for E1, R3 and R6.

are limited to three. We argue that this is enough to take all pest management decisions for the whole season and achieve satisfactory results.

Other works we have carried out with vine growers have shown that most of them observe each of their vineyards (60% of the surveyed growers)^g. Yet, these observations are rarely carried out with a systematic methodology and decision oriented objectives (only 35% declare alleviating or strengthening their crop protection program). *GrapeMilDeWS* proposes to replace these observations that check the crop protection's efficiency (61% of the answers), with observations that provide a picture of the epidemics which is precise enough to allow the grower to decide and act on them.

Furthermore, the epidemics levels' evaluations are positioned according to an estimation of the phenological stage. Figure 6.11 represents the experts' estimate of the phenological stages with phenological models based on cumulated temperatures.

The models have been fitted for each site and each cultivar over a dataset of systematic phenological evaluations from 2001 to 2005. Models "Early" represent the early organs at the plot scale; "Median" models indicate that, at a given value of the model, 50% of the organs in the plot are in or below that given stage; as for "Late" models, they represent the development of the most immature organs. The methodology for this modelling is

g. The statistics presented are part of an unpublished survey done by INRA/Santé végétale in 2006 for the ANR project "ADD Vin et Environnement Durable". The sample was composed of 103 vine growers from four Bordeaux RDOs.

presented in (Léger, 2008). The fitted data were collected into the Eichhorn and Lorenz scale (Eichhorn and Lorenz, 1977), which does not differentiate the foliar dynamic from the fruit one. The work from Coombe (1995) was used to establish a function from the Eichhorn and Lorenz scale to the BBCH scale.

The problem here is to define what the experts consider when estimating phenological stages. For instance, figure 6.11 shows that the experts' actions based on their phenological estimates are systematically late in 2005 compared to the fitted models, yet the opposite becomes true the following year.

One of the difficulties lies in how the focus is changed from monitoring the leaf development early in the season, to observing the fruits from pre flowering up to harvest. Understanding the way the experts switch from foliar to fruiting phenological monitoring would help in modelling *GrapeMilDeWS* and thus standardise its use. Indeed, the phenological stage estimate should be as disambiguated as possible in order to make better comparisons between experiments. However, that standardization should not sacrifice the operability of *GrapeMilDeWS*.

Further work with *GrapeMilDeWS* should also quantify the sensitivity of the model to the experts' interpretation of rain forecasts.

One of our future work is to design a powdery mildew equivalent to downy mildew's ILM. Indeed, spotting early powdery mildew symptoms requires some skills. Having a procedure to pool information on the beginning of the powdery mildew epidemics each year would be of great help. So far, in France, this information is not provided by the plant protection services.

6.4.4.4 Acceptability and risk management

Acceptability was indeed one of the concerns of the expert designers when they chose to have three mandatory applications, when they chose to limit the number of observations to three, and when they designed the decision system as a decision workflow broken down in 7 stages.

The design choices were mostly focused on acceptability, making sure that the process is economically and logistically feasible. However, on both years, experimental artefacts have been exhibited (at Stage_5 in 2005 and Stage_6 in 2006) due to the vineyard managers not perceiving the epidemic risk in the same way the phytopathologist experts did. The reason for that is the very long period between Stage_3 and Stage_6 during which no mandatory treatment is required. There is usually more than a month between the third evaluation E3 and the ripening period at which the last treatment T6 should be applied. Under low epidemic conditions at E3, a treatment at Stage_5 can be spared, but then there is necessarily a period during which the crop is not protected. From our experience, such scenarios are perceived as highly risky by the growers. In the advent of heavy rains, the experts were unable to coerce them into inaction. We can agree with the vineyard management, that there is a lack of consensus amongst professionals on the fact that under low epidemic pressure at cluster closure (the phenological stage at which the third evaluation is done), downy mildew could be controlled with only one treatment positioned at mid ripening.

6.4.5 Conclusion

An IPM crop protection annual strategy targeting two of the most aggressive pathogens of vineyard : *Plasmopara viticola* and *Erysiphe necator*, has been presented extensively in part.1 (Léger et al., 2008a) using a graphical yet mathematically sound formalism. This second paper, aims at assessing the quality of the GrapeMilDeWS' formal model.

Designed by expert phytopathologists, GrapeMilDeWS was evaluated for two years on four real scale plots. In the meantime, the model was elicited from the experts. In order to assess the model quality as a crop protection tool, we have proceeded in two times.

First, the crop protection experiments were presented and commented. Then we assessed the ability of the formal model GrapeMilDeWS used as a simulator, to take the same decisions as the experts did, had it been submitted to the same environmental conditions.

The experts when applying *oeGrapeMilDeWS* are able to protect the plots against both powdery and downy mildew, while achieving the Registered Designation of Origin target yield and quality (i.e. sugar concentrations). These results were achieved with roughly half the number of treatments applied by the Bordeaux region vine growers, and yet less than 5% severity at harvest for powdery mildew on the cluster and similar results for downy mildew on the leaves.

When evaluating if the formal model would have behaved as the experts, we used a comparison methodology structured in two steps. First, the overall fitness of the model's decisions to the experts' decision was evaluated. The second step, was much more critical, looking deep into both the simulations and the experiments to identify the causes of decision mismatches and temporal discrepancies.

The fitness evaluation was quite satisfactory since 85.1% of the decisions taken by the simulator match those of the experts. However, 44.8% out of 85.1% of the decisions were not made precisely at the same time; yet, no drift was found overall between the simulations and the experiments.

Furthermore, the discrepancies found were explained by three main factors. Indeed, when experimenting and devising GrapeMilDeWS, the expert designers were not always aware of their own resource management, and thus did not report on it when elicited. Comparison showed that when experimenting, the experts managed the plots through *batches of decisions* for operational reasons. Operational constraints were also the reason for the experts to regularly *re-synchronize* the four plots. The experts were also shown to use *anticipations* on some decisions in order to have the applications positioned in such a way that the crop would be better protected.

This later point is just impossible for the current implementation of the simulator to achieve, as it requires introspection and breaking temporal constraints. The formal model was elicited from the experts without accounting for anticipation and the chosen modelling technique should be adapted in the light of these findings.

Finally, the vineyard staffs were also found responsible of some of the discrepancies. GrapeMilDeWS being an experimental tool, the operational management felt on some occasions too risky not to protect the crop. These experimental artefacts are interesting

in that they question the acceptability of the solution.

In the next step, we will improve the formalism in order to satisfactorily represent the sequentiality of decisions in a more versatile way than Statechart did, yet formal enough to be considered a program. Timed Statechart should be investigated in this regard (Kesten and Pnueli, 1992; Graf et al., 2003).

The experiments have continued and been extended to professional vineyards. Transfer is our target for the future years. In order to achieve that goal, we will focus on evaluating GrapeMilDeWS' behaviour when run by non expert growers with the help of a prototype Decision Support System (DSS). But the more challenging work towards providing a DSS solution based on GrapeMilDeWS is in the operational research field (Naud et al., 2007). This research would allow to manage the whole vineyard estate through GrapeMilDeWS and still take the decisions at the plot scale. Another direction for our research is to find ways to lower the costs of observations through efficient observation generalisation mechanism. And finally; there is need for investigation on which organizational structures should be best for the sharing of the epidemic information between neighbouring growers especially where the land ownership is scattered as is the case in most French vineyards.

6.5 Discussion du Chapitre

La discussion de l'article est prolongée par cette section. D'abord on montre pourquoi cette validation était nécessaire dans le processus de formalisation du POD Mildium. Puis on évoque les points critiques de la méthode de conception mise en œuvre par l'unité Santé Végétale et comment la formalisation permettrait d'améliorer l'expérimentation. Enfin on évalue la généricité de la méthode de validation présentée dans le précédent article.

6.5.1 Méthode de validation

On a cherché à montrer que le modèle « Mildium formel » (Mf) simule (au sens de la définition 9) le POD « Mildium expert » (Mx). On a considéré Mx comme une boîte noire^h, mais dont une partie de son comportement peut être observée à partir des enregistrements issus de l'expérimentation. Il s'agit en effet de valider que Mf peut reproduire les comportements déjà observésⁱ. On recherche une preuve que la formalisation a bien assuré la reprise des acquis du passé.

A l'issue de cette validation on conclut que le modèle formel a valeur de référence, d'étalon. En effet, tout en conservant les structures et principes généraux du concept POD Mildium, le recueil de connaissances a permis d'objectiver l'expertise (c'est à dire de clarifier et de transcrire les choix de conception) mais la modélisation a aussi permis de couvrir l'ensemble des situations possibles de manière exhaustive. Cela a demandé aux experts de gérer des cas de figure non prévus et donc de créer de nouvelles réponses, de prendre position.

La validation a permis de montrer que, malgré les transformations issues du recueil, il n'y a pas eu de trahison du système de décision expérimenté. En montrant que Mf décide ce que Mx décidait, il devient possible de revendiquer pour le modèle l'efficacité agronomique obtenue par les experts au cours des expérimentations.

6.5.2 Résultat de la validation : les points critiques

Cette validation a également permis de mettre en évidence certains points critiques, en particulier le problème de l'estimation humaine de certaines entrées du modèle. Le cas de la phénologie est discuté ci-après.

Les résultats montrent que l'estimateur de phénologie ne peut être considéré comme une horloge absolue. Les experts se basent en effet sur leurs observations pour faire une estimation du stade parcellaire, mais ils considèrent l'hétérogénéité intra-parcellaire comme un estimateur des degrés de liberté temporelle dont ils disposent lorsqu'ils estiment l'urgence d'une action. Or la quantification des degrés de liberté temporelle à chaque étape de Mildium est l'une des questions importantes auxquelles il faut répondre

h. On a fait l'hypothèse que l'expertise tenait dans une boîte noire. Certes, avant la formalisation, les principes de conception de Mx avaient été énoncés, mais « l'objet » dans l'esprit des experts, n'avait pas de contour précis. En effet les concepteurs pouvaient à tout instant adapter le système pour résoudre une nouvelle difficulté.

i. Rappelons que la relation de simulation n'impose pas que le comportement de Mf se limite aux comportements observés de la Mx.

pour pouvoir en garantir l'efficacité sur le terrain. Les expérimentations menées en 2008 dans plusieurs vignobles méridionaux, par différentes équipes ont encore fait ressortir l'importance d'une mesure de référence de la phénologie. Sans cette référence quantitative, il n'est pas possible d'expliquer les écarts de réactivité des différents opérateurs.

A l'avenir, l'installation d'une station météorologique mesurant les températures dans chaque parcelle expérimentale, serait un moyen simple de régler ce problème, en y associant des modèles de développement phénologique (ceux-ci sont disponibles pour les principaux cépages, cf. Garcia de Cortazar, 2006). Cet outillage pourra être utilisé comme étalon, soit pour chercher à définir la fonction d'estimation de la phénologie utilisée par les experts, ou plus simplement, comme estimation directe de la phénologie et servant de base à la prise de décision.

6.5.3 Généricité de la méthode de validation

A la question de savoir si la méthode développée ici pourra être réutilisée, on peut apporter deux réponses :

- Dans le cadre de la validation du recueil d'un nouveau **POD** qui reproduirait la séquence « expérimentation, recueil, validation », il est trivial de dire que la mise en œuvre sera possible d'autant qu'on a montré à travers l'exemple de la phénologie comment s'abstraire avantageusement d'une variable de synchronisation pour finalement ne conserver que les séries d'événements et les mises à jour des variables de décision.
- Dans le cadre de la poursuite des expérimentations de Mildium (projet Systèmes Décisionnels pour une Réduction des Traitements phytosanitaires sur vigne Appel à Projets Protection Vigne (**A2PV**)), il s'agira non plus de valider un modèle vis à vis de comportements constatés, mais de vérifier la conformité des expérimentations vis à vis des contraintes imposées par le **POD**.

Les analyses pourront être menées dans un premier temps de manière identique à celles présentées dans l'article précédent. Par la suite, il sera possible, grâce à la massification des données, d'effectuer des classifications sur la base de région, de cépage, et de tenter d'identifier des sous-populations de comportement. La catégorisation deviendra probablement incontournable : la distribution de chaque délai tendant vers la normalité avec la massification des expérimentations.

Pour pouvoir exploiter les données collectées dans diverses régions sur des expérimentations conduites par différents acteurs, l'étalonnage par la phénologie devient nécessaire si l'on veut pouvoir analyser les séquences de Décision/Action au regard de la qualité de la réponse agronomique. La phénologie permettant de faire le lien entre le temps calendaire, le climat et les invariants biologiques de la culture.

L'analyse par comparaison aux simulations devra être favorisée dans la mesure où l'on travaille dans différentes régions et que les scénarios climatiques ne seront pas identiques. La comparaison avec la simulation permet de ne considérer que la conformité de l'exécution. Ces analyses devraient permettre d'identifier les contraintes de réactivité aux étapes clé du **POD** Mildium.

Chapitre 7

Conclusion

Contents

7.1	La formalisation a mis en évidence l'intérêt de la notion de processus pour l'étude des méthodes de protection des cultures	194
7.1.1	La réponse aux trois besoins des experts	194
7.1.2	Concevoir la décision en IPM comme un procédé	194
7.1.3	La formalisation aide à la conception par introspection	195
7.1.4	La formalisation aide à la conception par dissémination	195
7.1.5	Comment un Processus Opérationnel de Décision facilite le transfert de compétence en Protection Intégrée des Cultures par la preuve de concept	196
7.1.6	Vers un système de gestion à la parcelle des chantiers de protection des cultures	197
7.2	Vérification automatique de procédés	197
7.2.1	Logiques temporelles	198
7.2.2	Vérifier les propriétés des systèmes critiques	199
7.2.3	Le « model checking » et nos travaux	199
7.2.4	Le « model checking » à différents niveaux d'organisation	200
7.2.5	Conclusion à propos de la vérification	201
7.3	Généricité de la formalisation de POD en dehors de la protection des cultures	201
7.3.1	Le cas du génie des procédés agroalimentaires	201
7.3.1.1	Les indicateurs sensoriels	202
7.3.1.2	Maîtrise globale du procédé	202
7.3.2	Le cas de la vérification des « protocoles » médicaux	203
7.4	Le mot de la fin	205

*Parle moi des eaux de ton monde natal,
Paul-Muad'Dib.*

— FRANK HERBERT
Dune vol.1 (1965)

Dans ce dernier chapitre, je souligne les apports de mon travail de thèse d'un regard rétrospectif, pour une tentative de bilan. Je tracerai ensuite les pistes de recherche scientifique qu'il me semble pertinent de poursuivre dans le prolongement de ma thèse. Enfin, je positionnerai mon travail par rapport à des questionnements similaires en génie des procédés et génie hospitalier afin d'évaluer les perspectives de transfert vers d'autres domaines.

7.1 La formalisation a mis en évidence l'intérêt de la notion de processus pour l'étude des méthodes de protection des cultures

7.1.1 La réponse aux trois besoins des experts

Au cours de cette thèse, j'ai fourni des éléments de réponse à chacun des trois besoins :

Communication : Par le recueil et la formalisation d'un modèle complet du **POD** Mildium dans un formalisme dont l'expression graphique (Statechart) est accessible aux néophytes.

Opérationnalité : En implémentant un simulateur qui m'a permis de valider que les modèles recueillis peuvent reproduire les décisions prises par les experts au cours des expérimentations.

Fiabilité : En permettant aux experts d'améliorer, pendant le recueil de connaissances, certains points non élucidés de leur conception, mais aussi par l'analyse des simulations qui permettent d'identifier certains problèmes de conception.

Mais au-delà de la simulation, le processus de modélisation a permis de rendre le **POD** plus fiable grâce à l'emploi d'un formalisme adapté au type de problème traité.

7.1.2 Concevoir la décision en IPM comme un procédé

Le projet « action PIC » était pensé à l'origine comme une approche méthodologique devant aboutir à des cadres génériques pour la conception de stratégies opérationnelles de protection du vignoble. Ce point de départ était envisagé avec une terminologie et des représentations en termes de règles de décisions agronomiques. On a montré au cours du chapitre 1 que les spécificités du contrôle du mildiou et de l'oïdium de la vigne ont imposé aux experts concepteurs de penser leurs stratégies de protection comme un tout à l'échelle de la saison.

Ce raisonnement global est découpé en plusieurs étapes de décision qui donnent lieu à une séquence d'actions. Ce raisonnement m'est apparu être bien plus un Processus Opérationnel de Décision (**POD**) qu'un ensemble de règles de décision. Ce **POD** est piloté par des événements qui déclenchent tour à tour des observations au champ, des décisions de traitement ou qui conditionnent le passage d'une étape à l'autre. *L'hypothèse qu'un formalisme **SED** serait efficace pour représenter un **POD** du type de Mildium a donc été faite à partir de cette analyse.*

Pour vérifier cette hypothèse, j'ai choisi d'utiliser le langage de modélisation graphique Statechart. Il est évident que d'autres formalismes **SED** tels les Réseaux de Petri

ou encore les diagrammes d'activités auraient pu être utilisés. Cependant le choix des Statecharts s'est révélé bien adapté à la représentation à la fois : (i) d'une séquence d'étape, (ii) d'alternatives conditionnées par plusieurs variables décisionnelles et (iii) à l'expression d'états dans lesquels le temps s'écoule jusqu'à ce qu'un événement ou une condition déclenche une transition et l'exécution des actions associées à cette transition. Ainsi grâce à la possibilité de composer hiérarchiquement les états du Statechart, la représentation est concise et offre une bonne vue d'ensemble du système.

D'autre part les qualités d'expressivité formelle et de facilité d'interprétation intuitive de ces diagrammes m'ont poussé à questionner, *pour le recueil de connaissances, la possibilité d'utiliser un modèle Statechart comme truchement entre les experts concepteurs et le cognitifien*. Ce travail de recueil de connaissances a été mené avec succès, confirmant l'idée que le langage, bien que mathématiquement formel, est efficace pour communiquer entre acteurs de différentes formations.

7.1.3 La formalisation aide à la conception par introspection

A l'issue du recueil de connaissances, on dispose de deux produits : un modèle du procédé écrit avec des notations en langage quasi-naturel (pseudo code présenté au chapitre 5) et un modèle implémenté dans un simulateur et dans lequel les notations pseudo-code sont remplacées par la syntaxe de type C++ des Statecharts Rhapsody.

Nous avons cherché à valider la qualité du modèle formel créé. Cela a donné lieu à la conception d'une méthode de validation innovante, à partir de simulation, en l'absence de modèle biotechnique.

La qualité du modèle a été validée par l'analyse des simulations. Cette analyse a surtout mis en évidence qu'en l'absence de modèle biotechnique, l'étude des séquences de décision peut être riche d'enseignement sur le comportement des expérimentateurs-experts et par extension sur la qualité même du procédé modélisé. J'ai ainsi pu démontrer qu'au cours des essais, la prise de décision s'effectue au même instant pour toutes les parcelles, même si les décisions sont prises en fonction des exigences du contexte de la parcelle et conformément au **POD**. C'est le positionnement temporel des décisions qui n'est pas indépendant d'une parcelle à l'autre. Les expérimentateurs-experts n'avaient pas mentionné cet allotement au moment du recueil de connaissances. L'impact de ce phénomène sur la qualité de la protection du vignoble peut ne pas être négligeable^a notamment du fait des différences de précocité des cépages. Des études plus poussées sont nécessaires pour déterminer les stratégies d'allotement qu'il serait judicieux de mettre en place.

7.1.4 La formalisation aide à la conception par dissémination

Le Statechart en langage naturel permet de mener des expérimentations à plus large échelle. Avec ce modèle facilement compréhensible, il est possible de communiquer le **POD** Mildium au-delà du cercle de ses concepteurs. Le modèle a ainsi permis à l'équipe de rédiger un guide d'expérimentation, sur la base duquel des expérimentations ont pu être menées à grande échelle dans plusieurs régions de France (27 parcelles en 2008). Ces expérimentations nous permettent d'éclairer les relations temporelles entre prise de

a. Toutefois, L'impact réel de ce phénomène n'a pas pu être mesuré faute de données suffisantes.

décision, mise en œuvre et réponse biologique. Ces travaux devraient donner lieu à de nouvelles versions du **POD** Mildium, avec une itération prévue pour 2009.

7.1.5 Comment un Processus Opérationnel de Décision facilite le transfert de compétence en Protection Intégrée des Cultures par la preuve de concept

Nous avons observé un grand intérêt pour le **POD** Mildium, en 2007 chez les quatre viticulteurs du réseau **ADD-Vin** et auprès des viticulteurs et techniciens des chambres d'agriculture dans le cadre des expérimentations menées en 2008. Il est certes perçu comme un objet innovant et les agriculteurs perçoivent les risques que comporte l'expérimentation, mais l'accueil est globalement positif.

A partir du bilan que **McCown** (2002) dresse de l'usage des Outils d'Aide à la Décision dans la profession agricole, et au vu de l'intérêt que suscite le **POD** Mildium : une méthode prescriptive, on s'est demandé si la démarche consistant à proposer aux agriculteurs des systèmes qui fournissent l'ensemble de l'information et qui les laissent faire les arbitrages, ne serait pas sous-efficace faute de méthode dans la prise de décision ? L'argument avancé ici se base sur l'expérience qui a poussé les phytopathologistes de **SV** à démarrer la conception de « RDD » en 2001. Après de nombreuses conférences données sur l'épidémiologie de l'oïdium, ils n'ont constaté aucun impact sur le public professionnel. La conception de Mildium vise à illustrer les possibilités par l'exemple et à fournir une référence technique.

Michel Rocard tenait récemment les propos suivants :

Le métier des politiques c'est de choisir entre les remèdes proposés par les spécialistes, ce n'est pas de fabriquer eux-mêmes ces remèdes

in : Michel Rocard 28 octobre 2008

Si l'on remplace le terme « politiciens » par « agriculteurs » ou « chefs d'entreprise » cette phrase illustre parfaitement mon propos. Compte tenu du fait que le métier de l'agriculteur n'est pas d'être un spécialiste de la protection des végétaux, il me semble important d'entamer une réflexion dans le cadre de la **PIC** visant à proposer à l'agriculteur des références méthodologiques et opérationnelles validées lui permettant de modifier ses pratiques en suivant des stratégies éprouvées dont les avantages et les écueils sont bien identifiés. Les guides sous forme de collections de bonnes pratiques donnent des résultats, mais on peut espérer aller plus loin en proposant des stratégies pour coordonner ces bonnes pratiques. Il faut bien évidemment pouvoir le faire en respectant les spécificités des exploitations, des cultures et des traditions.

C'est cette démarche que se propose de suivre l'unité Santé Végétale et à laquelle ce travail de thèse contribue. D'abord il permet de disséminer sans perte d'information le **POD** Mildium, et ensuite de montrer par la modélisation de processus l'intérêt d'une vision globale, séquentielle et opérationnelle de la décision.

7.1.6 Vers un système de gestion à la parcelle des chantiers de protection des cultures

On considère que la gestion à la parcelle des opérations polluantes est particulièrement pertinente. En effet la minimisation de la consommation de produits phytosanitaires au niveau de l'exploitation, passe tout d'abord par le raisonnement des applications, à la parcelle, à la manière du **POD** Mildium. Au-delà de la gestion de chaque parcelle en fonction de son état sanitaire, il convient de gérer les aspects logistiques pour aboutir à des préconisations applicables. Un système informatisé devra donc aider l'agriculteur non seulement à prendre ses décisions, mais surtout à gérer l'information (état parcelle + état **POD**) de chacune de ses parcelles. Un tel système devrait être aussi être capable d'aider l'agriculteur à organiser au mieux les chantiers (voir [Naud et al., 2007](#); [Hernandez, 2007](#)), tout en lui laissant la possibilité de modifier les plans proposés et en lui indiquant l'impact de ses modifications, notamment en terme de risques épidémiques ou d'indisponibilité des ressources.

7.2 Vérification automatique de procédés

Au cours de cette section, on donne quelques éléments sur la vérification automatique^b (« model checking ») tant de fois évoquée au cours des chapitres précédents. La présentation sera nécessairement courte, et vise à illustrer les raisons de notre d'intérêt. Les lecteurs intéressés peuvent se référer à la présentation rapide qu'en fait [Hélias \(2003\)](#) ou de manière plus détaillée à ([Katoen, 2004, 1998](#); [Laroussinie, 2005](#))

Définition 24. Selon [Katoen \(2004, 1998\)](#), le « model checking » [vérification automatique] est une technique automatisée qui, étant donné un modèle à états finis d'un système et une propriété formelle, explore tous les états possibles du système par la « force brute » (brut force manner)[c'est à dire de façon énumérative et systématique].

Il s'agit pour nous de pouvoir vérifier la qualité d'un **POD** dès sa conception. Ce type de vérification peut paraître aisé dans le cadre d'une gestion manuelle du **POD** actuel sur un très petit nombre de parcelles. Mais dans le cadre d'un système informatique automatisant la gestion phytosanitaire de l'exploitation, un « bogue du **POD** » pourrait causer d'importantes pertes de récoltes.

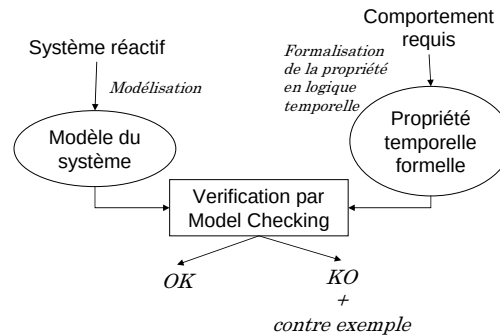
Au delà du débogage d'une stratégie représentée par un **POD**, le « model checking », doit permettre de tester son comportement au niveau de l'exploitation, c'est à dire la gestion combinée de plusieurs stratégies parcellaires combinées à la gestion des ressources.

La méthode est comparable à une simulation exhaustive de tous les scénarios possibles en parcourant l'ensemble du graphe d'états décrivant le système. En pratique il existe des techniques qui permettent de réduire la taille de l'espace d'états. Toutefois, le model checking reste une technique coûteuse en temps de calcul (la complexité est une exponentielle du nombre de processus concurrents), mais la validité d'une propriété testée sur un système par model checking est réputée démontrée. La méthode a été mise en œuvre dans de nombreux domaines (par exemple protocoles de communication, réseaux téléphoniques, aérospatiale. . .) mais aussi dans des applications médicales telles

b. la notion de vérification automatique en français est plus large que le seul model checking. Faute d'un meilleur traduction, on comprendra ici vérification automatique comme désignant le seul model checking

Protocure (ten Teije et al., 2006) ou en agriculture avec les travaux de Hélias (2003) et Largouët (2000).

Le principe du model checking est illustré par la figure 7.1



source : Katoen (1998)

FIGURE 7.1 – Principes du « model checking »

7.2.1 Logiques temporelles

Concrètement, le model checking permet, à l'aide de logiques temporelles, d'effectuer des « requêtes » sur les évolutions possibles d'un système. Les logiques temporelles sont une branche des logiques modales. Elles permettent de raisonner sur des séquences d'état. Le philosophe Prior a mené les premières réflexions dans le domaine dès 1967, mais les développements des logiques temporelles utilisées pour le model checking sont plus récents (« Linear Temporal Logic » ou « Linear Temporal Logic » (LTL) Pnueli, 1977). On se limitera ici à présenter la « Computational Tree Logic » (CTL) (Clarke and Emerson, 1981).

Les logiques de type CTL permettent d'envisager le futur comme une arborescence de choix possibles. Chaque choix ayant pour conséquence de modifier les comportements possibles à partir de l'état courant^c.

Cette logique se fonde sur les opérateurs booléens traditionnels, et sur quatre opérateurs temporels

- $\exists$: il existe,
- $\forall$: quel que soit,
- $\bigcirc$: suivant,
- $\cup$: jusqu'à.

qui peuvent être composés pour représenter l'ensemble des requêtes possibles. On déduit notamment les deux opérateurs macro suivants :

- $\exists \Diamond \phi \equiv \exists \text{vrai} \cup \phi$ c'est à dire : il existe une séquence où la formule ϕ est satisfaite au moins une fois.

c. Frank Herbert dans Dune, donne avec la pré science une assez bonne image de la manière dont le temps est pensé par les logiques arborescentes

- $\exists \Box \phi \equiv \exists \neg \Diamond \neg \phi$ c'est à dire : il existe une séquence où la formule ϕ est toujours vraie (ϕ est un invariant).

7.2.2 Vérifier les propriétés des systèmes critiques

Le tableau 7.1 illustre les principales propriétés des systèmes critiques^d testées avec le « model checking ».

type de propriétés	signification
atteignabilité	Sous certaines conditions, un état du système peut être atteint « une panne peut survenir »
sûreté	Sous certaines conditions, quelque chose n'arrive jamais « une panne est impossible »
vivacité	Sous certaines conditions, quelque chose finit par avoir lieu « une panne arrivera un jour »
vivacité bornée	Sous certaines conditions, quelque chose finit par avoir lieu avant un certain temps « une panne arrivera dans la journée »
équité	Sous certaines conditions, quelque chose a lieu infiniment souvent « le système marche infiniment souvent »
non blocage	Le système ne se trouve jamais dans un état qu'il ne peut plus quitter « une panne peut toujours être réparée »

source : D'après Bérard et al. (2001, in Hélias 2003)

TABLE 7.1 – Classes de propriétés pouvant être vérifiés

Toutes ces propriétés ne peuvent être exprimées pour toutes les logiques temporelles. Ainsi, la vivacité bornée nécessite que le temps soit quantifié. La « Timed Computational Tree Logic » (TCTL) (Alur et al., 1993) est une extension de la CTL qui permet d'exprimer des contraintes temporelles en terme de durée quantifiée (par exemple vivacité bornée in tab. 7.1). Le temps dans TCTL est mesuré par des horloges définies dans $\mathbb{R}$. Un modèle TCTL est représenté par un automate temporisé (Alur and Dill, 1994). On n'en présente pas les détails par souci de simplicité et de brièveté de l'exposé, on renverra le lecteur à (Katoen, 2004; Laroussinie, 2005; Yovine, 1993; Alur et al., 1993; Hélias, 2003; Tuitete, 2006).

7.2.3 Le « model checking » et nos travaux

On donne ci-après des exemples de propriété que l'on peut tester sur un modèle formel de POD en protection des cultures. Certaines requêtes peuvent être traitées par CTL, par exemple, si on souhaite s'assurer qu'un POD de protection des cultures vérifie :

d. Un système est dit critique si de lui dépend la sécurité d'un être humain ou plus largement, si sa défaillance rend impossible la réalisation d'un objectif

Existe-t'il une situation où une pluie ne déclencherait pas une application alors que la parcelle le nécessite ?

Cette question est triviale pour une règle de décision spécifiant un traitement avant toute pluie. Pour un système du type de Mildium qui tire avantage de l'acquisition de la résistance ontogénique des baies à partir de la mi-fermeture de la grappe, la réponse est plus difficile à déterminer.

D'autres types de requêtes impliquent l'utilisation de la logique TCTL, une requête typique pourrait être :

Serais-je toujours capable de traiter l'ensemble de mes parcelles avant la pluie si la prévision devient « certaine » deux jours seulement avant l'évènement ?

L'usage de TCTL se justifie d'autant plus qu'on a évoqué dans les chapitres précédents la possibilité d'ajouter des contraintes temporelles sur le modèle du POD. La « temporisation » de Mildium a pour objectif de mieux rendre compte de l'imprécision de l'expertise et de la variabilité due aux phénomènes biologiques qui finalement permet d'envisager une certaine incertitude sur « l'instant » précis auquel par exemple la première observation doit être effectuée. La temporisation pourra se faire directement en Statechart temporisé (Kesten and Pnueli, 1992) et une seconde transformation vers les automates temporisés sera nécessaire pour pouvoir faire la vérification. Il serait sinon possible d'utiliser les profils UML 2.0 OMEGA^e (Ober et al., 2006b; Kvas et al., 2005). Cette technologie permet de temporiser les modèles UML 2.0 et utilise la « toolbox » IFx pour le « model checking » (Ober et al., 2006a).

Le choix de la technologie la plus adaptée pour la vérification de système soumis à un environnement bioclimatique incertain n'a pas à l'heure actuelle été arrêté. Ainsi, nous ne savons pas si TCTL suffira ou s'il ne faudrait pas avoir recours à une extension stochastique tel « Probabilistic Timed Computational Tree Logic » (PTCTL) ou à une modélisation sous forme de chaîne de Markov (Kwiatkowska, 2003).

7.2.4 Le « model checking » à différents niveaux d'organisation

Au-delà de la protection intégrée du vignoble, on peut imaginer que le développement de solutions et de standards pour la *Production Intégrée* puisse être rationalisé par la modélisation des processus métiers, en association à une base de propriétés « standardisées » permettant de vérifier des stratégies de manière générique. Cette démarche serait comparable à la formalisation des « guidelines » médicales.

Au-delà des seules propriétés temporelles il est possible de vérifier d'autres types de propriétés. En modélisation d'entreprise, Chapurlat (2007) s'intéresse aussi aux propriétés des organisations avec une conception très large de la notion de propriété, qu'il modélise comme un quintuplet $P \models \langle C_D, E_D, R_{DD'}, D'', I_{D''} \rangle$ avec C_D l'ensemble des causes ; E_D l'ensemble des faits ; $R_{DD'}$ la relation de causalités qui peut être une relation (i) logique, (ii) temporelle, (iii) d'influence, (iv) d'émergence ; $I_{D''}$ l'ensemble des indicateurs permettant de suivre et de mesurer la véracité de la propriété^f. Chapurlat

e. <http://www-omega.imag.fr/>

f. cette présentation du modèle CREDI est volontairement succincte notamment la notion de niveau de granularité D, D', D'' n'est pas abordé.

développe les notions de base de propriété et la notion de patron d'organisation pour la modélisation d'entreprise.

7.2.5 Conclusion à propos de la vérification

Il serait ainsi possible de développer des stratégies de protection vues comme des POD et d'en garantir la qualité minimale grâce à des bases de propriétés, vérifiées de façon standards.

La figure 7.2 résume mon travail de thèse et indique comment la vérification automatique de propriétés temporelles pourrait le prolonger.

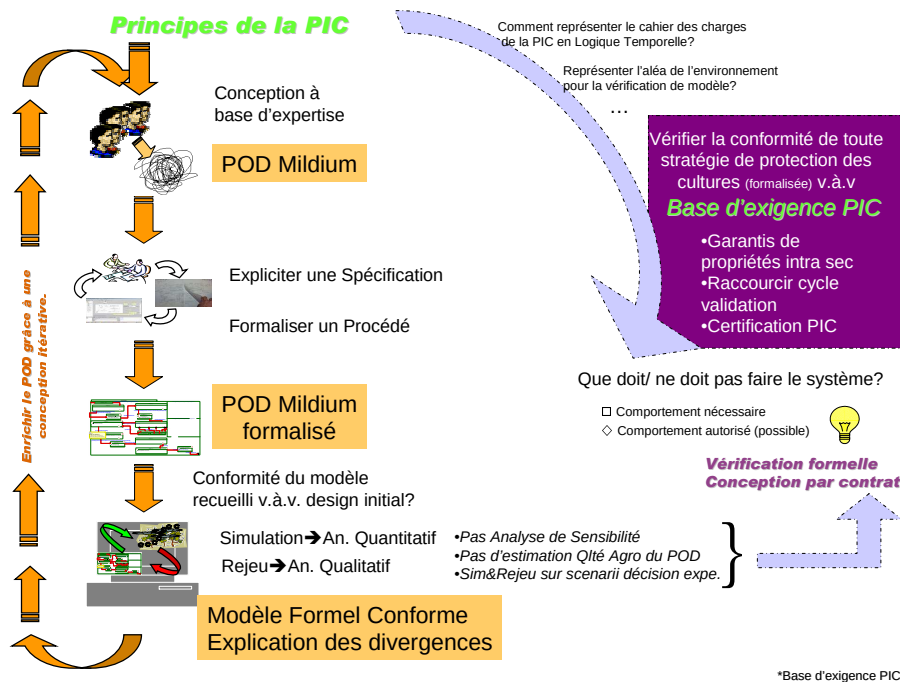


FIGURE 7.2 – Résumé des travaux présentés dans cette thèse et des perspectives proposées

7.3 Généricité de la formalisation de POD en dehors de la protection des cultures

Dans la section qui suit, à partir de deux exemples tirés de domaines d'application très différents de la protection des cultures : le génie des procédés agroalimentaires et la formalisation de « guidelines » médicales, j'analyse l'intérêt que peut présenter mon travail vis à vis de ces questions disciplinaires, mais également les apports potentiels que l'on peut tirer de ces recherches disciplinaires.

7.3.1 Le cas du génie des procédés agroalimentaires

Il n'est pas ici question de faire une revue exhaustive des travaux en génie des procédés agroalimentaires, mais simplement d'illustrer la proximité des questionnements. Les procédés agroalimentaires sont caractérisés par un grand nombre de tâches qui ne sont pas automatisées, où le recours à l'expertise de l'opérateur reste la seule méthode

de conduite du procédé (Edoura-Gaena, 2005). Par exemple, l'UMR Génie Industriel Alimentaire (GENIAL) du CEMAGREF a mené un programme de recherche visant à formaliser cette expertise, afin de l'intégrer dans une démarche de maîtrise des procédés et de la qualité.

7.3.1.1 Les indicateurs sensoriels

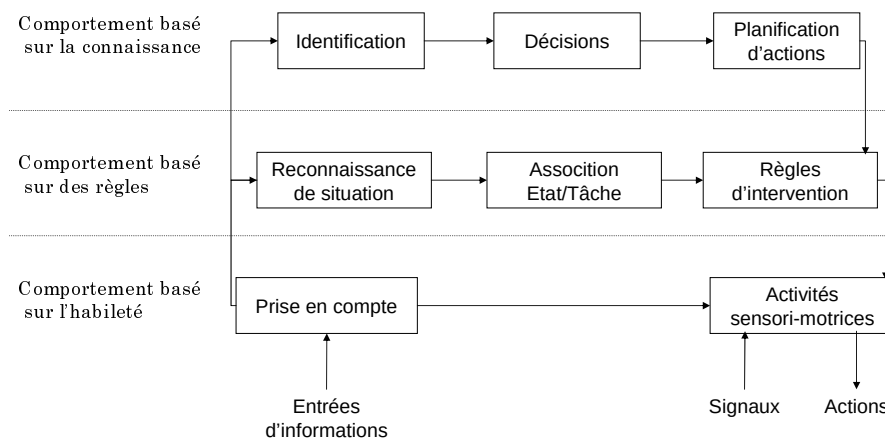
Il y a dans la démarche menée à GENIAL une proximité avec nos propres questionnements sur la manière de formaliser l'expertise portant sur le procédé Mildium. On note néanmoins des différences : Mildium est un prototype, le travail de formalisation s'inscrit alors dans une démarche de conception, quand les travaux de l'unité GENIAL s'attachent à extraire une connaissance existante, sur un procédé maîtrisé. Dans la mesure où le procédé existe et n'est pas remis en cause, la recherche porte sur l'explicitation de la décision des experts, et sur la formalisation des « *indicateurs sensoriels* » mis en œuvre par les opérateurs experts pour contrôler un procédé (étuvage du saucisson par exemple). Curt (2002) propose cette notion en concevant l'opérateur comme un « capteur » dans le procédé produisant des variables agrégatives. Avec les valeurs symboliques de ces variables, l'opérateur, dans son rôle de superviseur, est capable de prendre des décisions. Le recours aux indicateurs sensoriels est une manière de formaliser une connaissance implicite pour la transformer en connaissance symbolique utilisable dans un système expert d'aide à la conduite. Ces systèmes experts associent aux mesures sensorielles, des mesures quantitatives en ligne et produisent des préconisations (Curt, 2002; Ioannou, 2003; Edoura-Gaena, 2005).

Les méthodes d'extraction de connaissance et de formalisation d'indicateurs sensoriels devraient s'avérer utiles dans nos travaux pour préciser les définitions de variables décisionnelles telles que l'estimation de la phénologie. Cette variable est très intégrative. Une clarification des grilles d'interprétation devrait être produite, pour améliorer la qualité des résultats expérimentaux à grande échelle. Au-delà de l'expérimentation, il serait sans doute enrichissant, dans le cadre du transfert d'une version du POD Mildium, que l'agriculteur puisse s'inspirer et « étalonner » ses propres perceptions au regard des grilles d'interprétation utilisées par les experts concepteurs du système.

7.3.1.2 Maîtrise globale du procédé

Dans sa thèse Edoura-Gaena (2005) se réfère au modèle de Rasmussen (fig. 7.3) comme base de l'analyse du comportement de l'opérateur humain. Avec ce modèle, il étudie la conduite du procédé de foisonnement^g dans la fabrication de boudoir. Il applique la méthode d'extraction de connaissances proposée par Curt sur l'ensemble du procédé de fabrication du boudoir. Sa modélisation met en évidence l'utilisation de boucles de contrôle sur l'opération de foisonnement très en aval dans le procédé. Il montre que, suite à une dérive, la plupart des commandes effectuées par les opérateurs se concentrent sur les variables d'entrée ayant la réponse la plus rapide. Ces commandes sont en général appliquées en un point unique du procédé (souvent le foisonnement dans l'étude menée).

g. Opération en biscuiterie consistant à injecter un gaz dans un pâte pour obtenir une texture spéciale par exemple génoise, boudoir



source : Edoura-Gaena (2005, d'après Rasmussen)

FIGURE 7.3 – Modèle des comportements de l’opérateur humain en situation de conduite de procédé

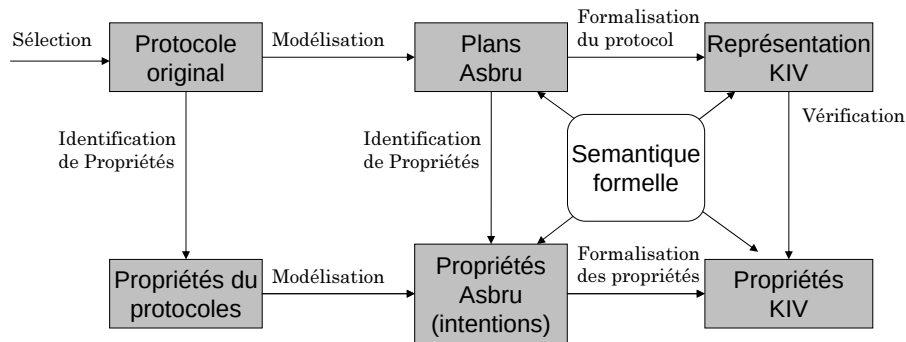
On remarque que si la plupart des cas peuvent être gérés de cette manière, il existe des situations de dérive complexe où divers effets se combinent et où la correction en un point du procédé de fabrication complet n’est pas possible. Dans ce cas, la combinatoire du problème est semble-t-il exponentielle et les systèmes automatisés sont mis en défaut^h. Les opérateurs parviennent néanmoins, par leur connaissance intégrée du procédé complet de fabrication, à rétablir le système. Allais (2007) considère que la modélisation des interactions opérateurs/procédés reste un enjeu pour la discipline du génie des procédés, il nous semble que l’exemple donné par Edoura-Gaena illustre l’enjeu de cette question.

La modélisation Statechart de **POD** que je propose est une tentative de représentation intégrée de l’organisation des décisions et des actions d’opérateurs confrontés à un problème de production fortement contraint. La modélisation des solutions d’urgence mises en œuvre par les opérateurs experts dans l’agroalimentaire pourrait parfaitement être réalisée avec les outils proposés ici. Toutefois, un travail d’adaptation des formalismes devrait être effectué pour modéliser des réponses proportionnelles. En effet le **POD** Mildium ne produit que des réponses binaires.

7.3.2 Le cas de la vérification des « protocoles » médicaux

Les travaux en santé humaine portant sur la modélisation de protocole médicaux (« medical guidelines »), nous semble particulièrement proches de nos problématiques, dans la mesure où il s’agit de modéliser des processus métiers fortement décisionnels et qui mettent en relation l’exécution de ces processus avec une réponse biologique, de façon très similaire au **POD**.

h. L’exemple donné indique que la correction habituelle de la dérive par une unique commande sur le foisonnement aurait des conséquences au niveau du calibre des biscuits et qui causeraient des pertes importantes à l’emballage.



source : ten Teije et al. (2006)

FIGURE 7.4 – Formalisation et vérification de protocoles dans le projet Protocure

Les protocoles médicaux visent à regrouper les meilleures pratiques dans le traitement d’une pathologie. Le développement de ces protocoles reçoit une grande attention de la communauté médicale dans la mesure où ces outils permettent d’améliorer la qualité des soins et de diminuer les coûts de santé. Le projet Européen *Protocure*ⁱ propose d’appliquer des méthodes de modélisation formelle aux guidelines médicales, pour en vérifier la qualité (Balser et al., 2004; ten Teije et al., 2006). Les guidelines se présentent en général sous la forme d’un corpus de texte décrivant les étapes de diagnostic et du processus de soin, rédigé en langage naturel. La démarche de formalisation et de vérification des guidelines est décrite par la figure 7.4.

Le protocole informel est tout d’abord modélisé avec le langage programmation de plans médicaux^j : *Asbru* (Miksch et al., 1997; Balser et al., 2002). Ce langage permet de représenter et d’exécuter les plans, mais n’est pas suffisamment formel pour permettre la vérification selon Balser et al. (2004). Le modèle *Asbru* est donc transformé en modèle formel KIV^k pour être interprété par le « theorem prover » KIV (Balser et al., 2000). Le processus de modélisation a permis d’identifier un certain nombre d’incohérences et d’inconsistances.

En parallèle les propriétés requises d’une bonne guideline sont identifiées pour être formalisées en *intentions Asbru*. En *Asbru*, les *intentions* sont une structure permettant d’exprimer les objectifs d’un plan. Les propriétés qui ont été utilisées pour vérifier les guidelines sont tirées de listes d’indicateurs de bonnes pratiques qui sont élaborées systématiquement par des experts médicaux (par exemple Van Gendt et al., 2005). Le passage d’indicateurs ou de propriétés exprimés en langage naturel vers des propriétés de logique temporelle (ici « interval temporal logic » ou ITL Moszkowski, 1985, in ten Teije et al. 2006) s’effectue en cinq étapes en utilisant un langage pivot. L’usage de ce « Goal Definition Language (GDL) » permet de garantir : (i) l’absence d’ambiguïté dans la transformation, (ii) la minimisation de la variabilité liée au cognicien, (iii) la préservation entre le langage naturel et la formule ITL, (iv) la traçabilité et (v) la réutilisabilité des éléments de la formule au cours de la formalisation des propriétés. Les

i. <http://www.protocure.org>

j. Au sens des *plans* vu au chapitre 3.

k. Karlsruhe Interactive Verifier

cinq étapes de la formalisation des propriétés sont :

La réduction : les experts fixent les propriétés en terme de pourcentage mesurant la qualité *ex post* du processus. Les valeurs des pourcentages sont sans intérêt pour la vérification, le but des ces statistiques est en général soit de maximiser une pratique, soit de minimiser un critère. La réduction cherche donc à réduire la propriété désirée à l'essence de son objectif : maximiser/minimiser un critère sous certaines conditions.

La normalisation : vise à faire apparaître les éléments de la condition temporelle à vérifier : un prédicat doit déclencher un comportement à partir d'un moment jusqu'à un autre moment

La formalisation : transforme le langage naturel en formule GDL implémentant essentiellement le découpage apparu lors de la normalisation : précondition ; début ; fin ; comportement attendu ;

L'attachement : consiste à remplacer les propositions en langage naturel de la formule GDL par leurs équivalents formels issus du modèle à vérifier, c'est essentiellement une étape d'interfaçage.

La traduction : consiste à produire une formule de logique temporelle bien formée à partir de la formule GDL. C'est une opération mécanique.

Cette méthode de formalisation des propriétés (Stegers et al., 2006) est une des rares méthodes de décomposition d'un objectif opérationnel vers une propriété formelle. Il me semble pourtant que cette question est centrale pour la dissémination de ces techniques de vérification automatique vers un public plus large.

Il nous faudra évaluer l'intérêt du langage *Asbru* pour la formalisation de **POD**. Le langage n'est pas graphique, mais la possibilité de modéliser les intentions d'une action constitue une possibilité formelle très intéressante pour le recueil de connaissances et la formalisation de **POD**.

Plus largement, il est certain que la recherche menée par le projet *Protocure* dans le domaine médical bénéficie grandement de l'intérêt porté par la profession médicale pour l'organisation du travail selon de protocoles standardisés. La manière dont les guidelines ont été disséminées en médecine constitue une piste intéressante pour choisir les meilleures techniques pour transférer et disséminer le **POD** Mildium dans la profession.

Ce tour d'horizon d'autres domaines, permet de mesurer toute l'actualité des questions posés par la modélisation de processus expert.

7.4 Le mot de la fin

A l'issu de ma thèse, le programme de recherche sur les **POD** a progressé techniquement avec la formalisation du **POD** Mildium, mais aussi en terme d'organisation et de synergies avec les acteurs de la filière qui montrent leur intérêt pour expérimenter et développer Mildium.

Plus largement, le grand défi pour les deux équipes dans lesquelles j'ai travaillé pendant ces trois années consiste, à la suite de cette thèse, à disséminer l'approche processus dans la communauté scientifique de la Protection Intégrée des Cultures.

Bibliographie

- Abt, V., 2007. Les cadres de représentation de la décision dans l'entreprise. éléments de réflexion à partir de l'entreprise agricole. In : Quatrième Workshop « Ingénierie et gestion des processus d'entreprise ». Dynamique des organisations et création de valeur : Apports des typologies et des cartographies de processus. Paris, p. 7. [cité p. 86]
- Abt, V., Pierreval, H., Vigier, F., Bigeon, J., Durand, C., 2005. Modéliser le fonctionnement et l'organisation des exploitations agricoles : quelles méthodes pour le secteur agricole. In : 6^{ème} Congrès International de Génie Industriel. Besancon France. [cité p. 85, 86]
- Agrios, G., 2005. Plant Pathology. Academic Press. [cité p. 23, 24, 29]
- Allais, I., 2007. Maîtrise des procédés alimentaires. apports de l'expérimentation et de l'expertise humaine pour la modélisation. Hdr, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand. [cité p. 203]
- Alur, R., Dill, D. L., 1994. A theory of timed automata. Theoretical Computer Science 126 (2), 183–235. [cité p. 55, 119, 154, 199]
- Alur, R., Henzinger, T. A., Ho, P.-H., 1993. Automatic symbolic verification of embedded systems. In : IEEE Real-Time Systems Symposium. pp. 2–11.
URL citeseer.ist.psu.edu/alur96automatic.html [cité p. 199]
- ASK, 2000. Enquête sur les exploitations viticoles et leurs pratiques phyto-sanitaires. ONIVINS-INFOS 78. [cité p. 10, 128, 162]
- Attonaty, J., Chartier, R., Chatelin, M., Hemidy, L., Leroy, P., Poussin, J., Schock, D., 1988. Systemes experts, micro-informatique et gestion des exploitations. INRA Sciences Sociales (5), 1–4, expert systems, computers and farm management 0988-3266. [cité p. 80]
- Attonaty, J., Chatelin, M., Poussin, J., Soler, L., 1994. Otelos : un simulateur a base de connaissance pour raisonner equipement et organisation du travail. In : (FRA), A.-A. P. d. C. d. (Ed.), Le conseil en agroéquipement et en organisation du travail. Outils et premières experiences. pp. 37–49, a knowledge-based simulation for work organization patterns and farm equipment decision support systems Cahiers des Chambres d'agriculture. Serie Organisation, methode, informatique ; *APCA Paris (FRA). [cité p. 80, 106, 154]
- Attonaty, J.-M., Chatelin, M.-H., Garcia, F., 1999. Interactive simulation modelling in farm decision-making. Computers and Electronics in Agriculture 22 (2-3), 157–170. [cité p. 97, 154]
- Aubertot, J., Barbier, J., Carpentier, A., Gril, J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M. (Eds.), 2005. Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Rapport d'Expertise scientifique collective. INRA et Cemagref (France). [cité p. 10, 11, 17, 20, 127, 162]
- Bae, J., Caverlee, J., Liu, L., Yan, H., 2006. Process mining by measuring process block similarity. In : Business Process Management Workshops. Vol. 4103 of Lect. Notes in Comp. Sci. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 141–152. [cité p. 111]
- Baggiolini, M., 1952. Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. Rev. Romande Agric. Vitic. Arbor 8, 4–6. [cité p. 237]
- Bakam, I., Kordon, F., Le Page, C., Bousquet, F., 2001. Formalization of a spatialized multiagent model using coloured petri nets for the study of an hunting management system. In : Formal Approaches to Agent-Based Systems. Vol. 1871. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 123–132, available from http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45484-5_10. [cité p. 106]

- Balser, M., Coltell, O., van Croonenborg, J., Duelli, C., van Harmelen, F., Jovell, A., Lucas, P., Marcos, M., Miksch, S., Reif, W., Rosenbrand, K., Seyfang, A., ten Teije, A., 2004. Protocure : supporting the development of medical protocols through formal methods. *Studies in health technology and informatics* 101, 103–107. [cité p. 204]
- Balser, M., Duelli, C., Reif, W., 2002. Formal semantics of asbru-an overview. In : *Proceedings of IDPT*. [cité p. 204]
- Balser, M., Reif, W., Schellhorn, G., Thums, A., 2000. A formal system development with kiv. In : Maibaum, T. (Ed.), *Fundamental approaches to software engineering*. Vol. 1783 of LNCS. Springer, New York. [cité p. 204]
- Baresi, L., Orso, A., Pezzé, M., 1997. Introducing formal methods in industrial practice. *Proceedings of the 20th Int.Conf. on Software Engineering*, 56–66. [cité p. 154]
- Barrett, A. R., Edwards, J. S., 1995. Knowledge elicitation and knowledge representation in a large domain with multiple experts. *Expert Systems with Applications* 8 (1), 169–176. [cité p. 109, 118]
- Bazoche, P., Cartolaro, P., Delhomme, B., Deliere, L., Goutouly, J.-P., Léger, B., Leroy, P., Naud, O., Soler, L., Ugaglia, A., 2008. Réduire les pesticides utilisés en viticulture : À quel prix ? *REVUE DES OENOLOGUES* 129 spécial. [cité p. 3, 11, 83, 159]
- Belhadj, A., Saigne, C., Telef, N., Cluzet, S., Bouscalt, J., Corio-Costet, M. F., Merillon, J. M., 2006. Methyl jasmonate induces defence responses in grapevine and triggers protection against *erysiphe necator*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54 (24), 9119–9125. [cité p. 20, 127]
- Berge, C., 1973. *Graphs and Hypergraphs*. North Holland, Amsterdam. [cité p. 66]
- Bergstra, J., Ponse, A., Smolka, S., 2001. *Handbook of Process Algebra*. Elsevier Science. [cité p. 61]
- Berio, G., Opdhal, A., Anaya, V., Dassisti, M., Panetto, H., Wohed, P., Baïna, S., 2005. Dem1 : Ueml 2.1, interoperability research for networked enterprises applications and software network of excellence, no. Tech. rep., INTEROP project UE-IST-508011 C, available from http://interop-vlab.eu/ei_public_deliverables/interop-noe-deliverables/dem-enterprise-modelling-and-ueml-unifying-for-interoperability-and-integration. [cité p. 86]
- Berry, G., Gonthier, G., 1992. *The Esterel Synchronous Programming Language : Design, Semantics, Implementation*. Institut National de Recherche en, Informatique et en Automatique. [cité p. 61]
- Bertin, J., 1973. *Semiologie graphique*. Gauthier-Villars. [cité p. 109]
- Black, P. E., 11 june 2008. finite state machine. *Dictionary of Algorithms and Data Structures*. U.S. National Institute of Standards and Technology, available from <http://www.nist.gov/dads/HTML/finiteStateMachine.html>. [cité p. 128]
- Blaise, P., Dietrich, R., Jermini, M., 1995. Coupling a disease epidemic model with a crop growth model to simulate yield losses of grapevine due to *plasmopara viticola*. *IV International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management* 416, 285–292. [cité p. 31]
- Blaise, P., Gessler, C., 1992. An extended progeny/parent ratio model. i : Theoretical development. *Journal of phytopathology* 134 (1), 39–52. [cité p. 27]

- Bleyer, G., Kassemeyer, H.-H., Viret, O., Siegfried, W., Krause, R., 2007. Vitimeteoplasmodia - a modern tool for integrated fungicide strategies. In : Lozzia, G. C., Lucchi, A., Ragusa Di Chiara, S., Tsolakis, H. (Eds.), Working Group "Integrated Protection in Viticulture", Proceedings of the Working Group meeting. Vol. 36 of IOBC/wprs Bulletin. IOBC, Marsala (Sicily, Italy), pp. 35–36. [cité p. 22, 31, 182]
- Boller, E., Avilla, J., Gendrier, J., Jörg, E., Malavolta, C., 1998. Integrated plant protection in the context of a sustainable agriculture. Bulletin OILB srop 21 (1). [cité p. 19, 21]
- Boller, E., Avilla, J., Joerg, E., Malavolta, C., Wijnands, F., Esbjerg, P. (Eds.), 2004. Integrated Production Principles and technical guidelines, 3rd Edition. Vol. 27 of Bulletin OILB srop. OILB/SROP commission Directives de PI et Agrément. [cité p. 18, 19, 21, 23]
- Booth, T. L., 1967. Sequential machines and automata theory. Wiley, New York. [cité p. 130]
- Borne, P., 1993. Analyse et régulation des processus industriels. Editions TECHNIP. [cité p. 50]
- Bouma, E., 2007. Computer aids for plant protection, historical perspective and future developments. EPPO Bulletin 37 (2), 247–254, available from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2338.2007.01119.x>. [cité p. 18]
- Bérard, B., Bidoit, M., Finkel, A., Laroussinie, F., Petit, A., Petrucci, L., Schnoebelen, P., 2001. Systems and software verification - model-checking techniques and tools. Springer-Verlag, Berlin (Allemagne). [cité p. 199]
- Brimble, R., Sellini, F., 2000. The moka modelling language. In : Knowledge Engineering and Knowledge Management, Proceedings. Vol. 1937 of Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 49–56, available from http://dx.doi.org/doi:10.1007/3-540-39967-4_4. [cité p. 109]
- Brundtland, H., 1987. Report of the world commission on environment and development : "our common future". Tech. Rep. A/42/427, ONU, available from :http://www.wikilivres.info/wiki/index.php/Rapport_Brundtland. [cité p. 15]
- CA11, 1999. Le mildiou de la vigne. Chambre d'agriculture de l'Aude. [cité p. 182]
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Delière, L., Chadoeuf, J., 2006. Powdery mildew on grapevine : the date of primary contamination affects disease development on leaves and damage on grape. Bulletin IOBC/srop 29 (11), 67–73. [cité p. 27]
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Naulin, J.-M., Bailey, D., Langlais, M., 2008. A host-pathogen simulation model : powdery mildew of grapevine. Plant Pathology 57 (3), 493–508. [cité p. 27]
- Calonnec, A., Cartolaro, P., Poupot, C., Dubourdieu, D., Darriet, P., 2004. Effects of *uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*vitis vinifera*) and wine. Plant Pathology 53 (4), 434–445. [cité p. 11, 27]
- Candolfi-Vasconcelos, M. C., Candolfi, M. P., Kohlet, W., 1994. Retranslocation of carbon reserves from the woody storage tissues into the fruit as a response to defoliation stress during the ripening period in *vitis vinifera* L. Planta 192 (4), 567–573. [cité p. 31, 151]
- Cannon-Bowers, Blickensderfer, 1993. Methods for eliciting strategic knowledge (tables). [Online], available from http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/nato/elicite_strat_knowledge.pdf valid as of aug. 2008. [cité p. 109]
- Carson, R., 1962. Silent Spring. Mariner Books, nouvelle édition 2002. [cité p. 2, 15]

- Cartolaro, P., Léger, B., Delière, L., Delbac, L., Clerjeau, M., Naud, O., nov. 2007. an expert based crop protection decision strategy against grapevine's powdery and downy mildews epidemics : Part 2) experimental design and results. In : IOBC/WPRS Working Group on "Integrated Control in Viticulture". IOBC, Marsala. [cité p. 107]
- Castillo, I., Smith, J. S., 2002. Formal modeling methodologies for control of manufacturing cells : Survey and comparison. *Journal of Manufacturing Systems* 21 (1), 40–57, soc. Manufacturing Engineers. [cité p. 154]
- Cerf, M., Sebillotte, M., 1988. Le concept de modele general et la prise de decision dans la conduite d'une culture. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 74 (4), 71–80. [cité p. 78]
- Chapurlat, V., 2007. Vérification et validation de modèles de systèmes complexes : application à la modélisation d'entreprise,. Ph.D. thesis, Université Montpellier II, hDR. [cité p. 85, 200]
- Chatelin, M., Aubry, C., Garcia, F., 2007. A novel method for the sustainable management of wheat crops : exploration by simulation. *Agronomy for Sustainable Development* 27 (4), 337–345. [cité p. 97]
- Chatelin, M.-H., Aubry, C., Leroy, P., Papy, F., Poussin, J.-C., 1993. Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. le cas des exploitations en grande culture. *Cah. Eco. Socio. Rur.* 28, 119–138. [cité p. 79]
- Chatelin, M. H., Aubry, C., Poussin, J. C., Meynard, J. M., Masse, J., Verjux, N., Gate, P., Le Bris, X., 2005. Decible, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems* 83 (1), 77–99. [cité p. 82]
- Chopra, K., Rush, R., Mendonça, D., Wallace, W., 2000. Acquiring and assessing knowledge from multiple experts using graphical representations. In : Leondes, C. T. (Ed.), *Knowledge Based Systems Techniques and Applications*. Academic Press, San Diego, CA, pp. 293–326. [cité p. 109, 110]
- Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., Sandra, M., 2005. Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew - plasmopara viticola). *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (1-3), 201–207. [cité p. 31]
- Clarke, E. M., Emerson, E. A., 1981. Design and synthesis of synchronization skeletons using branching-time temporal logic. In : *Logic of Programs*. pp. 52–71. [cité p. 198]
- Clerjeau, M., 2000. Appel à projets : Protection intégrée des cultures ; système de culture vigne. Tech. rep., Inra. [cité p. 30, 34]
- Clerjeau, M., 2004. Le problème de la décision des interventions phytosanitaires en protection intégrée de la vigne, [online]. In : *Innovigine et Vin*. [cité p. 35]
- Clerjeau, M., Soler, L.-G., nov. 2006. Nouvelles approches dans la protection du vignoble, [online]. Available from <http://www.inra.fr/internet/Projets/add-vin/resultats.htm>. [cité p. 13]
- Cohen, I. R., 2007. Real and artificial immune systems : computing the state of the body. *Nature Reviews Immunology* 7 (7), 569–574. [cité p. 154]
- Coombe, B. G., 1995. Growth stages of the grapevine : Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 1 (2), 104–110. [cité p. 185]
- Coulon, T., Hugueniot, F., 2008. production intégrée de raisins ; de la conception à l'application : état des pratiques et voies d'amélioration. *Itinéraires* 17, 34. [cité p. 22]

- Coulon, T., Sentenac, G. (Eds.), 2000. Référentielle national pour la production intégrée de raisins ; viticulture durable : quelle mise en pratique dans le vignoble français. Réf. nat. pour la prod. int. de raisins. IFVV. [cité p. 22, 35]
- Cournut, S., Dedieu, B., 2004. A discrete events simulation of flock dynamics : a management application to three lambings in two years. *Animal Research* 53 (5), 383–403. [cité p. 106]
- Crane, M., Dingel, J., 2007. UML vs. classical vs. rhapsody statecharts : not all models are created equal. *Software and Systems Modeling* 6 (4), 415–435. [cité p. 71, 108]
- Cristofini, B., Deffontaines, J., Raichon, C., de Verneuil, B., 1978. Pratiques d'élevage en castagniccia. exploration d'un milieu naturel et social en corse. *Etudes Rurales* 71-72, 89–109. [cité p. 78]
- Cros, M. J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2001. Simulating rotational grazing management. *Environment International* 27 (2-3), 139–145. [cité p. 84, 106, 154]
- Cruz-Lemus, J., Genero, M., Manso, M., Piattini, M., 2005. Evaluating the effect of composite states on the understandability of uml statechart diagrams. In : *Model Driven Engineering Languages and Systems*. Vol. 3713. Springer verlag, Berlin, pp. 113–125. [cité p. 66, 155]
- Cullen, E. M., Zalom, F. G., Flint, M. L., Zilbert, E. E., 2000. Quantifying trade-offs between pest sampling time and precision in commercial ipm sampling programs. *Agricultural Systems* 66 (2), 99–113. [cité p. 95]
- Curt, C., 2002. Méthode d'analyse, d'évaluation et de contrôle des propriétés sensorielles en conduite de procédé alimentaire. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Industrie Agricoles et Alimentaires. [cité p. 202]
- Dalla Marta, A., Magarey, R. D., Orlandini, S., 2005. Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in italy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132 (1-2), 84–95. [cité p. 31]
- Damm, W., Josko, B., Votintseva, A., Pnueli, A., 2003. A formal semantics for a UML kernel language. Tech. Rep. part 1 of the deliverable D1.1.2, Project IST-2001-33522 OMEGA. [cité p. 66, 67, 69, 71, 108, 132]
- Darriet, P., Pons, M., Henry, R., Dumont, O., Findeling, V., Cartolaro, P., Calonnec, A., Dubourdieu, D., 2002. Impact odorants contributing to the fungus type aroma from grape berries contaminated by powdery mildew (*uncinula necator*) ; incidence of enzymatic activities of the yeast *saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (11), 3277–3282. [cité p. 11]
- Davenport, T., James, E., 1990. The new industrial engineering : Information technology and business process redesign. *Sloan management review* 31 (4), 10. [cité p. 87]
- David, R., Alla, H., 1992. Du Grafcet aux réseaux de Petri. Hermès. [cité p. 61]
- Debaeke, P., Nolot, J.-M., Raffaillac, D., 2006. A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western france. *Agricultural Systems* 90 (1-3), 180–201. [cité p. 82]
- del Aguila, I., Túnez, S., Cañadas, J., Bosch, A., Marin, R., 2001. A proposal for project management using commonkads. In : *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2001*. Vol. 2178 of Lect. Notes in Comp. Sci. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 337–357, available from http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45654-6_13. [cité p. 109]

- Delbac, L., Brustis, J., Delière, L., Cartolaro, P., van Helden, M., Thiéry, D., Clerjeau, M., 2006. Development of decision rules for pest vineyard management. IOBC/wprs Bulletin 29, 41–42. [cité p. 35]
- Deliere, L., Cartolaro, P., Sauris, P., Couet, I., Gibert, C., 2003. Evaluation au vignoble de stratégies de traitement contre l'oïdium dans différent contexte epidémiques. In : AFPP - 7ème conférence internationale sur les maladies des plantes. Tours. [cité p. 20]
- Deliere, L., Clerjeau, M., 2001. Bases du raisonnement de la protection du vignoble. JOURNAL INTERNATIONAL DES SCIENCES DE LA VIGNE ET DU VIN 35, 143–150. [cité p. 34]
- Dent, D., 1995. Integrated Pest Management. Chapman & Hall. [cité p. 15, 18]
- Deola, C., Léger, B., Naud, O., Ugaglia, A., 2007. A bioeconomic model to train interdisciplinary research on reducing phytosanitary operations in the vineyards. Trèves, DE. [cité p. 83, 159]
- Diaz, M., 2001. Les réseaux de Petri : modèles fondamentaux. Hermes Science. [cité p. 61, 63]
- Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), 2006. L'agronomie aujourd'hui. Editions Quae, Versailles. [cité p. 77]
- Doumeingts, G., Vallespir, B., Chen, D., 1998. Grai grid decisional modeling, handbook on architectures of information systems. In : Bernus, P., Mertins, K., Schmidt, G. (Eds.), International Handbooks on Information Systems. Springer. [cité p. 85]
- Dounias, I., Aubry, C., Capillon, A., 2002. Decision-making processes for crop management on african farms. modelling from a case study of cotton crops in northern cameroon. Agricultural Systems 73 (3), 233–260. [cité p. 80]
- DRAF-SRISE, 2005. Taille des exploitations viticoles aquitaine par departement en 2005, [online]. Available from http://www.oav.agriculture.gouv.fr/IMG/xls/Taille_des_exploitations_viticoles_aquitaine_par_departement_en_2005_cle881ae1.xls. [cité p. 230]
- Dubos, B., 1999. Les maladies cryptogamiques de la vigne : les champignons parasites des organes herbacés et du bois de la vigne. Éditions Féret. [cité p. 23]
- Duru, M., Papy, F., Soler, L., 1988. Le concept de modele general et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 74 (4), 81–93. [cité p. 79, 80]
- Duso, C., Pozzebon, A., Capuzzo, C., Malagnini, V., Otto, S., Borgo, M., 2005. Grape downy mildew spread and mite seasonal abundance in vineyards : effects on tydeus caudatus and its predators. Biological Control 32 (1), 143–154. [cité p. 127]
- Edoura-Gaena, R., 2005. Analyse et aide à la conduite de l'opération de foisonnement dans un procédé de production biscuitier. exploitation de l'expertise des opérateurs. Ph.D. thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. [cité p. 202, 203]
- Eichhorn, K., Lorenz, D., 1977. Phenological development stages of the grapevine. Nachrichtenblatt-des-Deutschen-Pflanzenschutzdienstes 8 (29), 119–120. [cité p. 185]
- English-Loeb, G., Norton, A. P., Gadoury, D., Seem, R., Wilcox, W., 2007. Biological control of grape powdery mildew using mycophagous mites. Plant Disease 91 (4), 421–429. [cité p. 127]
- Eshuis, R., Wieringa, R., 2002. Verification support for workflow design with UML activity graphs. icse, 166–176, available from <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICSE.2002.1007965>. [cité p. 89, 183]

- Falk, S., Gadoury, D., Pearson, R., Seem, R., 1995. Partial control of grape powdery mildew by the mycoparasite *ampelomyces quisqualis*. *Plant Disease* 79 (5), 483–490. [cité p. 20]
- FAO-UNEP, 15-25 Oct. 1974. Report [...] to formulate an fao/unep cooperative global programme for the development and application of integrated pest control in agriculture. In : 5. Session of the Panel of Experts on Integrated Pest Control. Food and Agriculture Organization, Rome Italy, FAO-AGP-1974/M/8. [cité p. 15, 127]
- Fermaud, M., Pieri, P., Liminana, J., 2001. Botrytis et microclimat : Propagation de botrytis cinerea dans les grappes de raisin en conditions climatiques contrôlées : Vigne. *Phytoma, la défense des végétaux* (543), 40–43. [cité p. 13, 20]
- Ficke, A., Gadoury, D. M., Seem, R. C., 2002. Ontogenic resistance and plant disease management : A case study of grape powdery mildew. *Phytopathology* 92 (6), 671–675. [cité p. 26]
- Ford, D. N., Sterman, J. D., 1998. Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models. *System Dynamics Review* 14 (4), 309–340. [cité p. 110]
- Fountas, S., Wulfsohn, D., Blackmore, B. S., Jacobsen, H. L., Pedersen, S. M., 2006. A model of decision-making and information flows for information-intensive agriculture. *Agricultural Systems* 87 (2), 192–210. [cité p. 98]
- Frederiks, P., van der Weide, T., 2006. Information modeling : The process and the required competencies of its participants. *Data and Knowledge Engineering Application of natural language to information systems (NLDB04)* 58 (1), 4–20. [cité p. 110]
- Gaaloul, W., 2007. La découverte de workflow transactionnel pour la fiabilisation des exécutions. Ph.D. thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, available from <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00124083/fr/>. [cité p. 85, 87]
- Gadoury, D. M., Pearson, R. C., 1990. Ascocarp dehiscence and ascospore discharge in *uncinula necator*. *Phytopathology* 80 (4), 393–401, cited Reference Count : 36 ref. Journal article English. [cité p. 25]
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., Ficke, A., Wilcox, W. F., 2003. Ontogenic resistance to powdery mildew in grape berries. *Phytopathology* 93 (5), 547–555. [cité p. 26]
- Gaines, B. R., Shaw, M. L. G., 1993. Eliciting knowledge and transferring it effectively to a knowledge-based system. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 4–14. [cité p. 109]
- Galet, 1977. Les maladies et les parasites de la vigne. Vol. 1. Imprimerie du paysan du midi, Montpellier. [cité p. 11]
- Galet, P., 1991. Précis de pathologie viticole. P. Galet. [cité p. 23]
- Garcia, F., Martin-Clouaire, R., Nguyen, G. L., 2001. Generating decision rules by reinforcement learning for a class of crop management problems. [Online]. [cité p. 97]
- Garcia de Cortazar, I. n., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.) utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Ph.D. thesis, Ecole nationale superieur d'agronomie de Montpellier. [cité p. 167, 189]
- Gary, C., 2006. Rapport d'activité axe 1, [online]. Tech. rep., available from http://umr-system.cirad.fr/content/download/1045/6368/file/Regles_de_Decision.pdf. [cité p. 35, 36]
- Gentleware, oct 2007. Poseidon embedded edition. [Online], available from : <http://www.gentleware.com/uml-software-embedded-edition.html>. [cité p. 155]

- Girard, N., Bellon, S., Hubert, B., LARDON, S., MOULIN, C., OSTY, P., 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices : an approach based on examples of sheep farms in the south of france. *Agronomie* 21, 435–459. [cité p. 80]
- Girard, N., Hubert, B., 1999. Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids : the example of a knowledge-based model on grazing management. *Agricultural Systems* 59 (2), 123–144. [cité p. 129, 153]
- Glinz, M., 2002. Statecharts for requirements specification - as simple as possible, as rich as needed. In : ICSE International Workshop on Scenarios and State Machines : Models, Algorithms and Tools. Orlando, available from <http://www.cs.tut.fi/~tsysta/ICSE/papers/5.pdf>. [cité p. 103, 118, 155]
- Glinz, M., Berner, S., Joos, S., 2002. Object-oriented modeling with adora. *Information Systems* 27 (6), 425–444. [cité p. 103]
- Gobbin, D., Jermini, M., Loskill, B., Pertot, I., Raynal, M., Gessler, C., 2004. Redefinition of epidemiological cycle of plasmopara viticola. *Informatore Fitopatologico* 54 (4). [cité p. 31]
- Gobbin, D., Pertot, I., Gessler, C., 2003. Genetic structure of a plasmopara viticola population in an isolated italian mountain vineyard. *Journal of Phytopathology* 151 (11-12), 636–646. [cité p. 30]
- Gobbin, D., Rumbou, A., Linde, C. C., Gessler, C., 2006. Population genetic structure of plasmo-para viticola after 125 years of colonization in european vineyards. *Molecular Plant Pathology* 7 (6), 519–531, available from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1364-3703.2006.00357.x>. [cité p. 29]
- Gotsch, N., Braunschweig, T., 1999. Problem identification and knowledge acquisition for the solution of pest problems : A suggestion for a comprehensive approach. *Integrated Pest Management Reviews* 4 (3), 181–191. [cité p. 18]
- Graf, S., Ober, I., Ober, I., 2003. Timed annotations in UML. In : Workshop on Specification and Validation of UML models for Real Time and Embedded Systems (SVERTS 2003), a satellite event of UML 2003. [Online], San Francisco, available from <http://www-verimag.imag.fr/events/sverts/>. [cité p. 187]
- Grant, W., 2005. the challenges of interdisciplinary environmental research : the case of biopesticides. In : Northeastern Political Science Conference. Philadelphia, Pa USA. [cité p. 20]
- Grastien, A., 2005. Diagnostic décentralisé et en-ligne de systèmes à événements discrets reconfigurables. Ph.D. thesis, Université de Rennes 1, available from <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011757/fr/>. [cité p. 45, 46]
- Grossman, O., Harel, D., 1997. On the algorithmics of higraphs. Tech. Rep. CS97-15, Weizmann Science Press of Israel, available from : <http://citeseer.ist.psu.edu/55636.html>. [cité p. 155]
- Gubler, W., Rademacher, M., Vasquez, S., Thomas, C., 1999. Control of powdery mildew using the uc davis powdery mildew risk index. *American Phytopathology SocietyTY - JOUR*. [cité p. 20, 28]
- Hameed, A., Sleeman, D., Preece, A., 2002. Detecting mismatches among experts' ontologies acquired through knowledge elicitation. *Knowledge-Based Systems* 15 (5-6), 265–273, tY - JOUR. [cité p. 109]
- Hamon, G., Rushby, J., 2007. An operational semantics for stateflow. *Int. Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)* 9 (5), 447–456. [cité p. 71]

- Harel, D., 1987. Statecharts : A visual formalism for complex systems. *Sci. Comput. Program.* 8 (3), 231–274, available from [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9). [cité p. 4, 38, 64, 66, 67, 103, 107, 129, 131, 163]
- Harel, D., 1988. On visual formalisms. *Commun. ACM* 31 (5), 514–530, aCM Press. [cité p. 66, 155]
- Harel, D., 2004. A grand challenge for computing : Towards full reactive modeling of a multicellular animal. In : *Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 323–324, available from <http://www.springerlink.com/content/venvldmgb96j3m70/>. [cité p. 154]
- Harel, D., Efroni, S., Cohen, I. R., 2002. Reactive animation. In : *FMCO*. pp. 136–153, available from : <http://springerlink.metapress.com/openurl.asp?genre=article&issn=0302-9743&volume=2852&page=136>. [cité p. 154]
- Harel, D., Gery, E., 1996. Executable object modeling with statecharts. In : *ICSE '96 : Proceedings of the 18th Int.Conf. on Software engineering*. IEEE Computer Society, Berlin, Germany, pp. 246–257. [cité p. 131]
- Harel, D., Kugler, H., 2004. The RHAPSODY Semantics of Statecharts (or, On the Executable Core of the UML). In : *Integration of Software Specification Techniques for Application in Engineering*. Vol. 3147 of *Lect. Notes in Comp. Sci.* Springer-Verlag, pp. 325–354. [cité p. 66, 67, 71, 108, 131, 155, 163]
- Harel, D., Lachover, H., Naamad, A., Pnueli, A., Politi, M., Sherman, R., Shtull-Trauring, A., Trakhtenbrot, M., 1990. Statemate : a working environment for the development of complex-reactive systems. *Software Engineering, IEEE Transactions on* 16 (4), 403–414, available from <http://dx.doi.org/doi:10.1109/32.54292>. [cité p. 67, 71, 155]
- Harel, D., Pnueli, A., 1985. On the development of reactive systems. In : *Logics and models of concurrent systems*. Springer-Verlag New York, Inc., pp. 477–498. [cité p. 64, 108]
- Hélias, A., 2003. Agrégation/abstraction de modèles pour l'analyse et l'organisation de réseaux de flux : application à la gestion des effluents d'élevage à la réunion. thèse de doctorat, ENSA-M, Montpellier, presented on 12/18/2003. [cité p. 64, 155, 197, 198, 199]
- Hernandez, F., 2007. Model-checking et ordonnancement : Application à la décision de protection phytosanitaire de la vigne. Master thesis, Université Montpellier 2. [cité p. 197]
- Hoffman, L. E., Wilcox, W. F., Gadoury, D. M., Seem, R. C., Riegel, D. G., 2004. Integrated control of grape black rot : Influence of host phenology, inoculum availability, sanitation, and spray timing. *Phytopathology* 94 (6), 641–650. [cité p. 22, 128]
- Hughes, G., 1999. Sampling for decision making in crop loss assessment and pest management : Introduction. *Phytopathology* 89 (11), 1080–1083. [cité p. 95]
- Hunter, J. J., Ruffner, H. P., Volschenk, C. G., Le Roux, D. J., 1995. Partial Defoliation of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon/99 Richter : Effect on Root Growth, Canopy Efficiency ; Grape Composition, and Wine Quality. *Am. J. Enol. Vitic.* 46 (3), 306–314, available from : <http://www.ajevonline.org/cgi/content/abstract/46/3/306>. [cité p. 31, 151]
- IBM, oct 2007. Rational Rose Real Time. [Online], available from : <http://www.rational.com/products/rosert/index.jsp>. [cité p. 155]
- IDEF, Dec 1993. Integration definition for function modeling, ideo. Tech. rep., Federal Information Processing Standards Publications. [cité p. 86]

- IFVV, 2002. Référentielle national pour la production intégrée de raisins ; diagnostique technique de Production viticole intégrée. Réf. nat. pour la prod. int. de raisins. IFVV. [cité p. 22, 35]
- Ingrand, S., Cournut, S., Dedieu, B., Antheaume, F., 2003. La conduite de la reproduction du troupeau de vaches allaitantes : modélisation des prises de décision. PRODUCTIONS ANIMALES 16 (4), 263–270. [cité p. 79, 84]
- Ioannou, I., 2003. Mise en œuvre d’une approche symbolique floue pour la maîtrise de la qualité des produits alimentaires par contrôles du procédé. Ph.D. thesis, Université Blaise Pascal-Clermont II. [cité p. 202]
- Jailloux, F., Thind, T., Clerjeau, M., 1998. Release, germination, and pathogenicity of ascospores of *uncinula necator* under controlled conditions. Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique 76 (5), 777–781. [cité p. 26]
- Kam, N., Harel, D., Kugler, H., Marelly, R., Pnueli, A., Hubbard, E. J. A., Stern, M. J., 2003. Formal modeling of *c. elegans* development : A scenario-based approach. In : Proceedings of the First Int. Workshop on Computational Methods in Systems Biology. Vol. 2602 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, pp. 4–20. [cité p. 64, 154]
- Kast, W., 1995. A step by step risk analysis (sra) used for planning sprays against powdery mildew (oidiag-syhsstem). In : Workshop on Grapevine Downy and Powdery Mildew Modeling, 2nd. Proc. Int. [cité p. 22]
- Kast, W., Schiefer, H., 2003. Results of spray schedules using knowledge about ontogenetic resistance of grapes against powdery mildew. IOBC WPRS BULLETIN 26 (8), 87–90. [cité p. 30]
- Katoen, J., 1998. Concepts, Algorithms, and Tools for Model Checking. [cité p. 197, 198]
- Katoen, J., 2004. Principles of model checking. [cité p. 197, 199]
- Kennelly, M. M., Gadoury, D. M., Wilcox, W. F., Magarey, P. A., Seem, R. C., 2005. Seasonal development of ontogenic resistance to downy mildew in grape berries and rachises. Phytopathology 95 (12), 1445–1452, available from : <http://dx.doi.org/doi:10.1094/PHYTO-95-1445>. [cité p. 31]
- Kesten, Y., Pnueli, A., 1992. Timed and hybrid statecharts and their textual representation. Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems 571, 591–619. [cité p. 187, 200]
- Klein, S., 2005. Identification of discrete event systems for fault detection purposes. Ph.D. thesis, Ecole Normale Supérieure Cachan (FR). [cité p. 47, 48, 49, 56]
- Kogan, M., 1998. Integrated pest management : historical perspectives and contemporary developments. Annual Review of Entomology 43, 243–270. [cité p. 15, 18, 107, 127]
- Kortekamp, A., Zyprian, E., 2003. Characterization of plasmopara-resistance in grapevine using in vitro plants. Journal of Plant Physiology 160 (11), 1393–1400. [cité p. 30]
- Kwiatkowska, M., 2003. Model checking for probability and time : from theory to practice. In : LICS '03 : Proceedings of the 18th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, p. 351. [cité p. 200]
- Kyas, M., Jacob, J., Ober, I., Ober, I., Votintseva, A., Jan. 2005. D2.2.3 final tool set for system verification annex 1. omega syntax for users. Tech. Rep. IST/33522/D2.2.3-A1, Verimag. [cité p. 200]
- Ladrière, J., 2008. Système (épistémologie). In : Encyclopaedia Universalis. Vol. 19. Encyclopaedia Universalis, Paris, pp. 1029–1032. [cité p. 46]

- Landeta, J., 2006. Current validity of the delphi method in social sciences. *Technological Forecasting and Social Change* 73 (5), 467–482. [cité p. 109]
- Largouët, C., 2000. Aide à l'interprétation d'une séquence d'images par la modélisation du système observé. application à la reconnaissance de l'occupation du sol. Thèse de doctorat, Université de Rennes I. [cité p. 155, 198]
- Laroussinie, F., 2005. Model checking temporisé — algorithmes efficaces et complexité. Mémoire d'habilitation, Université Paris 7, Paris, France. [cité p. 197, 199]
- Lavazza, L., del Bianco, V., 2001. D 5.2 : Dess process modeling : methodology and support (version 1), dess public deliverables Available from <http://www.dess-itea.org/deliverables/>. [cité p. 86, 88]
- Léger, B., March 2008. Modèles phénologiques BBCH du Cabernet Sauvignon et du Merlot sur les sites de Couhins Cadaujac et du Grand Parc Latresne, internal report. [cité p. 185]
- Léger, B., Naud, O., 2007. Experimenting statecharts for multiple experts knowledge elicitation in agriculture. In : 4th IFAC-MCPL07. Vol. 3. Sibiu - Romania, pp. 869–874. [cité p. 130, 163, 164]
- Léger, B., Naud, O., Bellon-Maurel, V., Clerjeau, M., Delière, L., Cartolaro, P., Delbac, L., 2008a. GrapeMilDeWS (part1) an IPM Decision Process against grapevine powdery and downy mildews. (Submitted to) *Agricultural Systems*. [cité p. 162, 181, 186]
- Léger, B., Naud, O., Clerjeau, M., Bellon-Maurel, V., Delière, L., Cartolaro, P., Delbac, L., 2008b. GrapeMilDeWS (part.2) Experimenting an IPM Decision Process against grapevine powdery and downy mildews. (Submitted to) *Agricultural Systems*. [cité p. 129, 134, 137, 153]
- Lemoigne, J. L., 2008. Systèmes (science des). In : *Encyclopaedia Universalis*. Vol. 19. *Encyclopaedia Universalis*, Paris, pp. 1032–1037. [cité p. 9, 46]
- Lepoivre, P., 2007. Phytopathologie : Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. De Boeck Université. [cité p. 23]
- Lin, F., Wonham, W., 1988. On observability of discrete-event systems. *Information Sciences : an International Journal* 44 (3), 173–198. [cité p. 50]
- Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., Weber, E., 1995. Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. spp *vinifera*) - codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 1 (2), 100–103. [cité p. 30, 137, 167]
- Lunze, J., 2000. Process supervision by means of qualitative models. *Annual Reviews in Control* 24, 41–54. [cité p. 43, 45, 106]
- Macki, J., Strauss, A., 1982. *Introduction to Optimal Control Theory*. Springer-Verlag. [cité p. 49]
- Madden, L. V., Ellis, M. A., Lalancette, N., Hughes, G., Wilson, L. L., 2000. Evaluation of a disease warning system for downy mildew of grapes. *Plant Disease* 84 (5), 549–554. [cité p. 20, 31]
- Maggiolo-Schettini, A., Peron, A., Tini, S., 2003. A comparison of statecharts step semantics. *Theoretical Computer Science* 290 (1), 465–498. [cité p. 108, 131, 132]
- Magnien, C., Jacquin, D., Muckensturm, N., Guillemard, P., 1991. Milvit : un modèle descriptif et quantitatif de la phase asexuée du mildiou de la vigne. présentation et premiers résultats de validation. *EPPO Bulletin* 21 (3), 451–459. [cité p. 20]

- Malavolta, C., Boller, E. (Eds.), 1999. Directives pour la Production Intégrée des Raisins, 8th Edition. Vol. 22 of Bulletin OILB srop. En court de révision. [cité p. 16, 22]
- Marandet, P., 2006. Etude des comportements décisionnels et des pratiques de protection du vignoble dans le bordelais. mémoire de fin d'études. option gestion intégrée des agro-systèmes et des forêts. Master's thesis, ENITA de Bordeaux, Bordeaux. [cité p. 228, 233]
- Marandet, P., 2007. Typologie des pratiques de protection du vignoble dans le bordelais. Document interne, uMR Santé Végétale INRA de Bordeaux. [cité p. 228, 229, 239]
- Martin-Clouaire, R., Rellier, J., 2002. Fondements ontologiques des systèmes pilotés. Rapport interne, BIA-INRA. [cité p. 84, 97]
- Martin-Clouaire, R., Rellier, J., 2003. Modélisation et simulation de la conduite d'un système de production agricole. In : actes de la 4 ème Conférence de Modélisation et Simulation-Organisation et Conduite d'Activité dans l'Industrie et les Services (MOSIM'03). pp. 699–704. [cité p. 83, 97]
- Massink, M., Latella, D., Gnesi, S., 2006. On testing UML statecharts. *Journal of Logic and Algebraic Programming* 69 (1-2), 1–74. [cité p. 111]
- Matasci, C., Gobbin, D., Schärer, H.-J., Tamm, L., Gessler, C., 2008. Selection for fungicide resistance throughout a growing season in populations of *plasmopara viticola*. *European Journal of Plant Pathology* 120 (1), 79–83. [cité p. 20, 128]
- Mathworks, Mar 2008. Stateflow® 7.1. [Online], available from : <http://www.mathworks.com/products/stateflow/>. [cité p. 71, 155]
- McCown, R., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions : problems, paradigms, and prospects. *Agricultural Systems* 74 (1), 179–220. [cité p. 82, 196]
- Medsker, L., Tan, M., Turban, E., 1995. Knowledge acquisition from multiple experts - problems and issues. *Expert Systems with Applications* 9 (1), 35–40. [cité p. 109]
- Mendonca, D., Rush, R., Wallace, W. A., 2000. Timely knowledge elicitation from geographically separate, mobile experts during emergency response. *Safety Science* 35 (1-3), 193–208. [cité p. 109]
- Merlin, P. M., 1974. A study of the recoverability of computing systems. Ph.D. thesis. [cité p. 63]
- Meynard, J., Dore, T., Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France* 87 (4), 223–236. [cité p. 35]
- Meynard, J. M., Dore, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach : cropping systems and plant diseases. *Comptes Rendus Biologies* 326 (1), 37–46. [cité p. 16]
- Miksch, S., Shahar, Y., Jonhson, P., 1997. Asbru : A task-specific, intention-based and time-oriented language for representing skeletal plans. In : Motta, E., Hamelen, F., Pierret-Golbreich, C., Filby, I., Wijngaards, N. (Eds.), 7th workshop on Knowledge Engineering : Methods & Languages (KEML97). Milton Keynes, UK. [cité p. 204]
- Milton, N., Clarke, D., Shadbolt, N., 2006. Knowledge engineering and psychology : Towards a closer relationship. *International Journal of Human-Computer Studies* 64 (12), 1214–1229. [cité p. 110]
- MinAgri, 4 Mai 2002. Arrêté du 30 avril 2002 relatif au référentiel de l'agriculture raisonnée. *Journal Officiel* 104 (2002-631), 8519, version consolidée au 14 février 2007, disponible en ligne : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000592069&categorieLien=cid>. [cité p. 11, 18, 19]

- Mosterman, P. J., Vangheluwe, H., 2004. Computer automated multi-paradigm modeling : An introduction. *Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* 80 (9), 433–450. [cité p. 155]
- Moszkowski, B., 1985. A temporal logic for multilevel reasoning about hardware. *IEEE Transactions on Computers* 18 (2), 1–9. [cité p. 204]
- Nader, R., 1965. *Unsafe at Any Speed : The Designed-in Dangers of the American Automobile*. Grossman. [cité p. 16]
- Naud, O., Tuitete, T., Léger, B., Hélias, A., Giroudeau, R., 2008. Systèmes à événements discrets : de la simulation à l'analyse temporelle de la décision en agriculture. *e-STA-Spécial STIC&Environnement'07* 5 (2). [cité p. 235]
- Naud, O., Tuitete, T., Léger, B., Hélias, A., Hernandez, F., Giroudeau, R., 2007. Systèmes réactifs pour modéliser la décision en production agricole : Exemples à propos des traitements phytosanitaires. In : *MSR'2007 - Modélisation des Systèmes Réactifs*,. Lavoisier, Lyon, France, pp. 159–174. [cité p. 187, 197]
- Nesme, T., Brisson, N., Lescourret, F., Bellon, S., Crete, X., Plenet, D., Habib, R., 2006. Epistics : A dynamic model to generate nitrogen fertilisation and irrigation schedules in apple orchards, with special attention to qualitative evaluation of the model. *Agricultural Systems* 90 (1-3), 202–225. [cité p. 82]
- Ober, I., Graf, S., Lesens, D., 2006a. Modeling and validation of a software architecture for the ariane-5 launcher. In : *Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems*. Vol. 4037. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 48–62, available from http://dx.doi.org/10.1007/11768869_6. [cité p. 200]
- Ober, I., Graf, S., Ober, I., 2006b. Validating timed uml models by simulation and verification. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)* V8 (2), 128–145. [cité p. 200]
- Oliva, J., Navarro, S., Navarro, G., Camara, M. A., Barba, A., 1999. Integrated control of grape berry moth (*lobesia botrana*), powdery mildew (*uncinula necator*), downy mildew (*plasmopara viticola*) and grapevine sour rot (*acetobacter spp.*). *Crop Protection* 18 (9), 581–587. [cité p. 128]
- OMG, oct 2007. Unified modelling languages 2.0. [Online], available from www.uml.org. [cité p. 131]
- Onivins (Ed.), 2003. *Faits et chiffres*. Faits et chiffres (Onivins). Onivins, Paris. [cité p. 10]
- Paillotin, G., 17 juin 2008. Rapport final du président du comité opérationnel « Ecophyto 2018 ». Rapport officiel, Ministère de l'agriculture et de la Pêche, available from <http://agriculture.gouv.fr/sections/publications/rapports>. [cité p. 2, 52]
- Papy, F., 1998. Savoir pratique sur les systèmes techniques et aide à la décision. In : Biarnès, A. (Ed.), *La conduite du champ cultivé*. Points de vue d'agronomes. IRD, pp. 245–259. [cité p. 77, 78, 79, 80, 153]
- Parker, C., 2001. An approach to requirements analysis for decision support systems. *International Journal of Human-Computer Studies* 55 (4), 423–433, times Cited : 0 Cited Reference Count : 27 English Article INT J HUM-COMPUT STUDIES Sp. Iss. SI 485LZ. [cité p. 82]
- PCPACK, 2007. [online]. Available from <http://www.epistemics.co.uk/> as of Aug. 2008. [cité p. 109]
- Pearson, R., Goheen, A., 1988. *Compendium of Grape Diseases*. APS Press St. Paul, Minn.(USA). [cité p. 23, 25]

- Penczek, W., Pólrola, A., 2006. Advances in Verification of Time Petri Nets and Timed Automata, a temporal logic approach. Vol. 20 of Studies in Computational Intelligence. Springer. [cité p. 154]
- Philippi, S., Hill, H. J., 2007. Communication support for systems engineering - process modelling and animation with april. Journal of Systems and Software 80 (8), 1305–1316. [cité p. 154]
- Pnueli, A., 1977. The temporal logic of programs. In : FOCS. pp. 46–57. [cité p. 198]
- Poussin, J. C., avr 1992. O t e l o : Organisation du travail et langage à objets. document de travail, INRA-ESR ;INRA-SAD ;ORSTOM. [cité p. 81]
- PROTEGE, 2007. [online]. Available from <http://protege.stanford.edu/> as of Aug. 2008. [cité p. 109]
- R-Development-Core-Team, 2008. The R Project for Statistical Computing. [Online], available from <http://www.r-project.org/>. [cité p. 173]
- Ramadge, P., Wonham, W., 1989. The control of discrete event systems. Proceedings of the IEEE 77 (1), 81–98. [cité p. 54, 56]
- Rapilly, F., 1991. L'épidémiologie en pathologie végétale. Editions Quae. [cité p. 23, 30]
- Rellier, J., Martin-Clouaire, R., Navarrete, M., Jeannequin, B., Gary, C., Montbroussous, B., Tchamitchian, M., Baille, A., 1997. Modeling and simulating decision making for greenhouse tomato production : The conserto project. II Modelling Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation 456, 485–492. [cité p. 84]
- Reuveni, M., 1998. Relationships between leaf age, peroxidase and beta-1,3-glucanase activity, and resistance to downy mildew in grapevines. Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift 146 (10), 525–530. [cité p. 30]
- Ronzon, C., Clerjeau, M., 1988. Prévoir la gravité des attaques de mildiou dès l'hiver. Phytoma (mars), 40–42. [cité p. 29]
- Rossi, V., Caffi, T., Giosue, S., Bugiani, R., 2008. A mechanistic model simulating primary infections of downy mildew in grapevine. Ecological Modelling 212 (3-4), 480–491. [cité p. 31]
- Rouzet, J., Jacquin, D., 2003. Development of overwintering oospores of *plasmopara viticola* and severity of primary foci in relation to climate. EPPO Bulletin 33 (3), 437–442, available from : <http://dx.doi.org/doi:10.1111/j.1365-2338.2003.00670.x>. [cité p. 31, 52, 93, 153]
- Rozinat, A., van der Aalst, W. M. P., 2008. Conformance checking of processes based on monitoring real behavior. Information Systems 33 (1), 64–95. [cité p. 114]
- Rumbou, A., Gessler, C., 2006. Particular structure of *plasmopara viticola* populations evolved under greek island conditions. Phytopathology 96 (5), 501–509. [cité p. 30]
- Sall, M., 1980. Epidemiology of grape powdery mildew : A model. The American Phytopathological Society, 338–342. [cité p. 27]
- Savary, S., 1991. Approches de la Pathologie des Cultures Tropicales. Exemples de l'Arachide en Afrique de l'Ouest., karthala/ orstom Edition. Paris. [cité p. 17]
- Savary, S., Mille, B., Rolland, B., Lucas, P., 2006. Patterns and management of crop multiple pathosystems. European Journal of Plant Pathology 115 (1), 123–138, available from <http://dx.doi.org/doi:10.1146/annurev.phyto.44.070505.143342>. [cité p. 16]
- Scholz, P., 1998. Design of reactive systems and their distributed implementation with statecharts. Phd thesis, Technischen Universität (TUM), tH08_C1. [cité p. 67, 120]

- Scholz, P., 2001. Incremental design of statechart specifications. *Science of Computer Programming* 40 (1), 119–145, tY - JOUR. [cité p. 120]
- Schreiber, G. T., Akkermans, H., 2000. Knowledge engineering and management : the Common-KADS methodology. MIT Press. [cité p. 109]
- Sebillote, M., 1987a. Du champ cultivé aux pratiques des agriculteurs. réflexions sur l'agronomie actuelle. *C. R. Académie d'Agriculture Française* 73 (8), 69–81. [cité p. 129]
- Sebillote, M., 1987b. Du champ cultivate aux pratiques des agriculteurs. réflexions sur l'agronomie actuelle. *C. R. Académie d'Agriculture Française* 73 (8), 69–81, in French. [cité p. 268]
- Sebillote, M., Soler, L.-G., 1988. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *C. R. Académie d'Agriculture Française* 74, 59–70. [cité p. 78, 79, 98, 106, 128, 154]
- Sebillote, M., 1974. Agronomie et agriculture. essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers de l'ORSTOM* 24, 3–25. [cité p. 77]
- Sebillote, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C. R. Académie d'Agriculture Française* 11, 906–914. [cité p. 128]
- Segarra, J., Jeger, M., van den Bosch, F., 2001. Epidemic dynamics and patterns of plant diseases. *Phytopathology* 91 (10), 1001–1010. [cité p. 138]
- Serrano, E., 2001. L'effeuillage de la vigne. In : Bideault, J. M. (Ed.), *Les Cahiers Itinéraires d'ITV France*. ITV, Gaillac, p. 15, available from : saturne.io.reseau-concept.net/saisie/upload/137029/Itinéraires_1.pdf. [cité p. 43, 231]
- Shaffer, M., Bartling, P., Ascoug, J., 2000. Object-oriented simulation of integrated whole farms : Gpfarm framework. *Computers and Electronics in Agriculture* 28 (1), 29–49. [cité p. 84]
- Shaffer, M. J., Brodahl, M. K., 1998. Rule-based management for simulation in agricultural decision support systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 21 (2), 135–152. [cité p. 84, 106, 129]
- Shtienberg, D., 2000. Modelling : the basis for rational disease management. *Crop Protection* 19, 747–752. [cité p. 17, 18, 36]
- Simon, H., 1957. *Administration Behaviour : Studymaking processive in Administrative Organization*. Economica, Paris, trad. Fr. [cité p. 78]
- Simon, H., 1978. Rationality as process and as product of thought. *The American Economic Review* 68 (2), 1–16. [cité p. 78]
- SRPV-Aquitaine, oct 2007. Avertissements agricoles. [Online], available from http://www.srpv-aquitaine.com/_publique/default_public.asp. [cité p. 134]
- Stegers, R., ten Teije, A., van Harmelen, R., 2006. From natural language to formal proof goal - structured goal formalisation applied to medical guidelines. In : *Managing Knowledge in a World of Networks, Proceedings*. Vol. 4248 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. pp. 51–58. [cité p. 205]
- Stummer, B. E., Francis, I. L., Markides, A. J., Scott, E. S., 2003. The effect of powdery mildew infection of grape berries on juice and wine composition and on sensory properties of chardonnay wines. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 9 (1), 28–39. [cité p. 28]
- Svetinovic, D., Berry, D. M., Day, N. A., Godfrey, M. W., 2007. Unified use case statecharts : case studies. *Requir. Eng.* 12 (4), 245–264, available from <http://dx.doi.org/10.1007/s00766-007-0053-1>. [cité p. 103]

- Tang, S., Xiao, Y., Chen, L., Cheke, R., 2005. Integrated pest management models and their dynamical behaviour. *Bulletin of Mathematical Biology* 67 (1), 115–135. [cité p. 44]
- Teissier, J., 1979. Relations entre techniques et pratiques. *Bulletin de l'Inrap* 38. [cité p. 78]
- Telelogic, oct 2007. Rhapsody. [Online], available from : <http://www.telelogic.com/products/rhapsody>. [cité p. 155]
- ten Teije, A., Marcos, M., Balser, M., van Croonenborg, J., Duelli, C., van Harmelen, F., Lucas, P., Miksch, S., Reif, W., Rosenbrand, K., Seyfang, A., 2006. Improving medical protocols by formal methods. *Artificial Intelligence in Medicine* 36 (3), 193–209. [cité p. 154, 198, 204]
- Thind, T., Arora, J., Mohan, C., Raj, P., 2004. Epidemiology of powdery mildew, downy mildew and anthracnose diseases of grapevine. In : *Diseases of Fruits and Vegetables Volume I*. Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 621–638, available from http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2606-4_14. [cité p. 127]
- TLFI, 2008. le trésor de la langue française informatique. [Online], available from <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>. [cité p. 45]
- Tran Manh Sung, C., Strizyk, C., Clerjeau, M., 1990. Simulation of the date of maturity of plasmodia oospores to predict the severity of primary infections in grapevine. *Plant Disease* 74, 120–124. [cité p. 20, 31, 153]
- Travis, J. W., Latin, R. X., 1991. Development, implementation, and adoption of expert systems in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology* 29 (1), 343–360, available from : <http://dx.doi.org/doi:10.1146/annurev.py.29.090191.002015>. [cité p. 129]
- Trigiano, R., 2004. *Plant Pathology : Concepts and Laboratory Exercises*. CRC Press. [cité p. 23]
- Tuitete, T., 2006. Ordonnancement de tâches phytosanitaires vinicoles. Master's thesis, Université Montpellier II. [cité p. 199]
- UE, 1991. Directive du conseil du 15 juillet 1991 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (91/414/cee). *Journal officiel de l'Union européenne* L 230, 1–32. [cité p. 12]
- van der Aalst, W., van Hee, K., 2002. *Workflow Management : Models, Methods, and Systems*. MIT Press. [cité p. 61, 87, 96, 128]
- van der Aalst, W., van Hee, K., Houben, G., 1994. Modelling and analysing workflow using a petri-net based approach. *Proc. 2nd Workshop on Computer-Supported Cooperative Work, Petri nets and related formalisms*, 31–50. [cité p. 87, 183]
- van der Aalst, W., Weijters, T. (Eds.), 2004. *Computers in Industry*. Vol. 53 of *Process / Workflow Mining*. Elsevier B.V. [cité p. 87]
- Van Gendt, M., Ten Teije, A., Serban, R., Van Harmelen, F., 2005. Formalising medical quality indicators to improve guidelines, 3581st Edition. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. [cité p. 204]
- van Helden, M., Fargeas, E., Fronzes, M., O., M., Thibaud, M., Gil, F., Pain, G., 2006. The influence of local and landscape characteristics on insect pest population levels in viticulture. *IOBC/wprs Bulletin* 29, 145–149. [cité p. 18]
- Vanderplank, J., 1963. *Plant diseases : epidemic and control*. Academic Press, New York. [cité p. 27, 42]

- Vernadat, F., 1999. Techniques de Modélisation en Entreprise : Applications aux Processus Opérationnels,. Economica, Paris. [cité p. 85]
- von der Beeck, M., 1994. A comparison of statecharts variants. In : H. Langmaack, W.-P. de Rover, J. V. (Ed.), ProCoS : Proceedings of the Third Int.Symposium Organized Jointly with the Working Group Provably Correct Systems on Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems. Vol. 863 of Lect. Notes in Comp. Sci. Springer-Verlag, London, UK, pp. 128–148. [cité p. 71, 108, 131]
- Waard, M. A., Georgopoulos, S. G., Hollomon, D. W., Ishii, H., Leroux, P., Ragsdale, N. N., Schwinn, F. J., 1993. Chemical control of plant diseases : Problems and prospects. Annual Review of Phytopathology 31 (1), 403–421, available online at : <http://dx.doi.org/doi:10.1146/annurev.py.31.090193.002155>. [cité p. 20, 128]
- Wauchope, R. D., Ahuja, L. R., Arnold, J. G., Bingner, R., Lowrance, R., van Genuchten, M. T., Adams, L. D., 2003. Software for pest-management science : computer models and databases from the united states department of agriculture - agricultural research service. Pest Management Science 59 (6-7), 691–698. [cité p. 154]
- Webb, K., White, T., 2005. UML as a cell and biochemistry modeling language. Biosystems 80 (3), 283–302, 35 Elsevier Sci Ltd. [cité p. 154]
- Willoquet, L., Clerjeau, M., 1998. An analysis of the effects of environmental factors on conidial dispersal of *uncinula necator* (grape powdery mildew) in vineyards. Plant Pathology 47 (3), 227–233. [cité p. 27]
- Wonham, W., jul 2008. Supervisory control of discrete-event systems. [Online], available from [Accessible en Ligne :] <http://www.control.utoronto.ca/DES>. [cité p. 56, 57]
- Yovine, S., 1993. Méthodes et outils pour la vérification symbolique de systèmes temporisés. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. [cité p. 154, 199]
- Zadoks, J., 1989. Epipre, a computer-based decision support system for pest and disease control in wheat : Its development and implementation in europe. Plant Disease Epidemiology 2, 3–29. [cité p. 82]
- Zadoks, J., Schein, R., 1979. Epidemiology and plant disease management. Oxford University Press, New York (US). [cité p. 27]
- Zanettin, M., Doumeingts, G., 1992. The GIM Method for CIM system analysis. International Institute for advanced Studies in System Research and Cybernetics, Baden Baden. [cité p. 85]
- Zeigler, B., Praehofer, H., Kim, T., 2000. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press. [cité p. 104, 106]
- Zheng, W. J. J., 2006. Engineering approaches toward biological information integration at the systems level. Current Bioinformatics 1 (1), 85–93, zheng, Wenjin J. 159 Bentham Science Publ LTD. [cité p. 154]

Annexes

Annexe A

Typologie des pratiques de protection du vignoble dans le Bordelais

A.1 Sondage des Pratiques Phytosanitaires en Bordelais

Dans le cadre du projet [ADD-Vin](#) de l'ANR (programme [ADD](#)) au cours du [WP.1.4](#) : « Caractérisation des variables techniques et économiques conditionnant la gestion des risques sanitaires » nous avons demandé à Pierre Marandet de préparer, sur la base des pratiques recueillies auprès de quatre exploitations, une enquête plus représentative portant sur les pratiques phytosanitaires des viticulteurs bordelais ([Marandet, 2006](#)). Ce sont les résultats de cette enquête dont nous rendons compte ci-après. ([Marandet, 2007](#))

A.1.1 Objectifs de l'étude

Cette étude vise à décrire les pratiques phytosanitaires dans le vignoble bordelais et à expliquer le nombre de traitements contre l'oïdium et le mildiou. Le premier objectif se construit autour des thèmes suivants :

1. Caractéristiques générales de l'exploitation
2. Contexte agronomique
3. Perception des maladies et risque accepté
4. Caractérisation de la stratégie de lutte contre les bio-agresseurs
5. Les informations mobilisées
6. Mise en oeuvre des traitements

Le second objectif est obtenu par la construction d'une typologie selon les axes d'analyses suivants :

- Caractéristiques générales de l'exploitation
- Contexte agronomique
- Objectifs de protection
- Stratégie de protection
- Informations

Ces typologies sont ensuite utilisées pour expliquer les traitements anti-mildiou et anti-oïdium. Une typologie globale est établie à partir de l'ensemble des typologies thématiques. Cette typologie permet de donner les caractéristiques discriminantes ou au moins le nombre de traitements moyen et/ou leurs variances.

A.1.2 Protocole d'enquête

Le protocole d'enquête a été le suivant :

Le vignoble bordelais s'étend sur 124 726 Ha et compte près de 9 176 exploitations. Il regroupe 57 appellations différentes. Pour réaliser notre sondage, nous avons utilisé la méthode des quotas et travaillé seulement sur quelques appellations parmi les plus importantes en terme de surface et en nombre d'exploitations en tentant de reproduire les proportions des différentes situations potentiellement existantes. Nous avons au préalable regroupé les appellations, à dire d'expert selon le degré de similitude des

pratiques (voir tableau ci-dessous) estimé à partir du prestige de l'appellation. Nous avons ainsi créé deux groupes. Nous avons fait l'hypothèse que les pratiques des viticulteurs d'appellations au prestige similaire étaient semblables ce qui reste à vérifier. Nous avons enquêté dans 4 appellations d'origine contrôlée : les appellations Bordeaux/Bordeaux supérieur, Pauillac, Pessac-Léognan, Médoc/Haut-Médoc

in : Marandet (2007)

Les exploitations de l'échantillon ont été tirées au sort parmi les adhérents des syndicats viticoles de chacune des appellations concernées. Ceci permet de s'affranchir des biais potentiels que les listing provenant d'organismes de conseil auraient pu induire. Les données ayant servi à construire l'échantillon (voir tab. A.1) sont présentées en tab. A.2. Une centaine de réponses étaient attendues. On donnera un pourcentage en nombre entier, puisque la marge d'erreur pour un pourcentage de 50% sur un échantillon de 100 individus se situe entre 9 et 10%.

	Appellation	Obj.(%)	Nbr. d'envois	Tx. de retour (%)	Contrib. (%)
Prestige	Médoc	30	62	48,4	25,4
	Pauillac				
	Pessac				
Gen.	Bdx	70	178	49,4	74,6

TABLE A.1 – L'échantillon retenu

A.1.3 Constitution de l'échantillon

Appellation	Prestige				
	Médoc appellation communales	Pomerol, Fronsac	St Emilion	Pessac Léognan	Médoc et Haut-Médoc
Nb exploitations	457	405	895	68	656
% nb exploitations/dépt	5,0	4,4	9,8	0,7	7,1
Superficie vigne appellation (Ha)	8 829	4 483	9 988	1 613	7 669
% surfaces/dépt	7,8	4,0	8,8	1,4	6,8
Superficie moyenne par exploitation (Ha)	19,3	11,1	11,2		11,7
Production vin appellation (Hl)	472 991	233 271	532 907	65 143	413 308
Proportion vin blanc	0	0,01	0	0,18	0

nombre exploitations groupe 1	2481
contribution au nb total d'exploitations	0,27
% souhaité d'exploitations du groupe dans l'échantillon	30

Générique (Gen.)							
Graves	Blancs moelleux	Castillon, Francs	Premières Côtes de Bordeaux	Bourg, Blaye	Bordeaux	Entre-Deux-Mers	St Foy, St Macaire
320	291	302	490	1 431	1 023	1 975	863
3,5	3,2	3,3	5,3	15,6	11,1	21,5	9,4
3 896	4 746	3 307	7 520	14 966	8 980	31 463	17 266
3,4	4,2	2,9	6,6	13,2	7,9	27,7	15,2
	16,3	11	15,3	10,5	8,8	15,9	20
174 002	167 431	186 022	403 442	820 337	502 025	1 864 059	1 009 123
0,19	0,59	0,01	0,2	0,08	0,03	0,17	0,21

nombre exploitations groupe 2	6695
contribution au nb total d'exploitations	0,73
% souhaité d'exploitations du groupe dans l'échantillon	70

nombre total d'exploitations	9176
------------------------------	------

surface totale	124 726
----------------	---------

TABLE A.2 – Les appellations du vignobles Bordelais, leurs surfaces et le nombre d'exploitations

Le questionnaire a été construit sur la base des informations recueillies auprès des quatre viticulteurs du réseau **ADD-Vin** enquêté pendant la saison 2006. Cette enquête a permis de faire émerger les thèmes présentés ci-dessus. Le questionnaire est présenté en annexe **A.3**. Le sondage a été envoyé par courrier aux exploitations sélectionnées.

Les données de sondage ont été enregistrées sous Sphinx®, les traitements de données ont été réalisés avec Microsoft Excel® et statbox®. Les typologies ont été construites avec Statlab®.

A.2 Résultats de l'enquête

On débutera par le contexte général de l'exploitation. La présentation ici faite des résultats est synthétique, seuls les résultats éclairants les pratiques phytosanitaires des viticulteurs bordelais sont présentés.

A.2.1 Contexte générale de L'exploitation

Les tableaux tab. **A.3(a)** et tab. **A.3(b)** sont donnés pour références. Il est appréciable que les réponses respectent les quotas visés. Pour autant, en terme de superficie, il semble que le sondage ait touché des exploitations de grande taille puisque la DRAF SRISE estimait à 17.2ha la surface moyenne des exploitations de Gironde (DRAF-SRISE, 2005) (voir aussi tab. **A.1.3** en annexe **A**). En terme de système de production, 3 réponses ne concernaient pas la viticulture conventionnelle (1 NR, 1 bio, 1 biodynamie).

Appellation	Nb. Cit	Freq. (%)
Bordeaux/Bordeaux Sup.	73	65,2
Médoc/Haut-Médoc	4	3,6
App. Médoc communale	15	13,4
Graves	1	0,9
Pessac-Léognan	13	11,6
Autres	6	5,4
Total	112	

Le nombre de citations est supérieur au nombre d'observations du fait de réponses multiples (2 au maximum).

(a) A quelle zone géographique appartient votre vignoble

	Nb. Cit.	Freq. (%)
N.R.	1	1
Moins de 20	15	14,6
De 20 à 40	39	37,9
De 40 à 60	22	21,4
De 60 à 80	11	10,7
De 80 à 100	9	8,7
100 et plus	6	5,8
total	103	100,1

La moyenne et l'écart type sont calculés sans tenir compte des non-réponses.

(b) Quelle est la superficie, en Ha, de votre vignoble ?

TABLE A.3 – Caractéristiques des exploitations

La répartition du statut de la personne décidant des traitement est très différente selon que l'exploitation appartient à une appellation prestigieuse (70% d'employés sont en charge des traitements) ou à une appellation générique (99% de propriétaires dans ce second cas), voir tab. **A.4**).

26% des personnes interrogées affirment être coopérateurs (ce qui correspond à une légère sous-représentation de cette population par rapport aux 34% déclarés sur le site internet ^a de la Fédération des Coopératives Vinicoles d'Aquitaine (FCVA).

a. www.fcva.com vu le 03/06/2007

exploitant	Gen.(%)	Prestige(%)	total(%)
employé	1	70	19
propriétaire	99	30	81
total	100	100	100

*Ces données sont calculées sur la base de 119 individus.
les appellations génériques sont sur-représentées.*

TABLE A.4 – Etes-vous propriétaire ? (selon le groupe)

Le Test d'indépendance du chi deux (χ^2) à 5% nous permet de rejeter l'hypothèse selon laquelle les coopérateurs appliquent un nombre moyen de traitements anti-mildiou et anti-oïdium différent de la moyenne de la population de viticulteurs.

Remarque : on peut se demander si cela reste vrai dans chacun des deux groupes ; par exemple un coopérateur en appellation prestigieuse applique-t-il autant de traitements que ses voisins ?

A.2.2 Pratiques Agronomiques

64% des viticulteurs déclarent pratiquer l'enherbement, lorsqu'ils sont interrogés sur les raisons de cette pratique, l'ensemble des viticulteurs interrogés^b évoque en premier lieu la réduction de la vigueur de la vigne, puis une raison technique : l'amélioration de la portance du sol et en troisième position à égalité : la réduction de l'érosion et l'utilisation d'herbicide.

La réduction de la vigueur est souvent considérée comme une mesure prophylactique, de même que l'effeuillage et l'ébourgeonnage (Serrano, 2001), mais ces trois pratiques culturales sont principalement liées aux objectifs de qualité du raisin. Si 90% des interrogés déclarent pratiquer l'effeuillage et seulement 56% l'ébourgeonnage, on observe (tab. A.5) que le *groupe prestige* pratique plus systématiquement à la fois l'effeuillage et l'ébourgeonnage, quand les viticulteurs du *groupe générique* se limitent à l'effeuillage seul. Plus préoccupant en terme de protection sont les 58% des viticulteurs qui ne font pas systématiquement un relevage et un rognage avant de traiter.

	Gen.(%)	Prestige(%)	χ^2
Ebourgeonnage	80.0	20.0	NS
Effeuillage	91.2	8.8	***
Eff. Et Ebourg.	56.1	43.9	***
Aucun des deux	100.0	0.0	NS
total	71.3	28.7	

*NS : non significatif à 10% ; *** significatif à 1%*

TABLE A.5 – Tableau de contingence travaux en vert

b. Viticulteurs pratiquant ou non l'enherbement

A.2.3 Perception des maladies

Pour autant les pratiques présentées précédemment n'expliquent pas le fait que 60% des viticulteurs déclarent avoir connu des échecs de protections. Lorsque l'on interroge

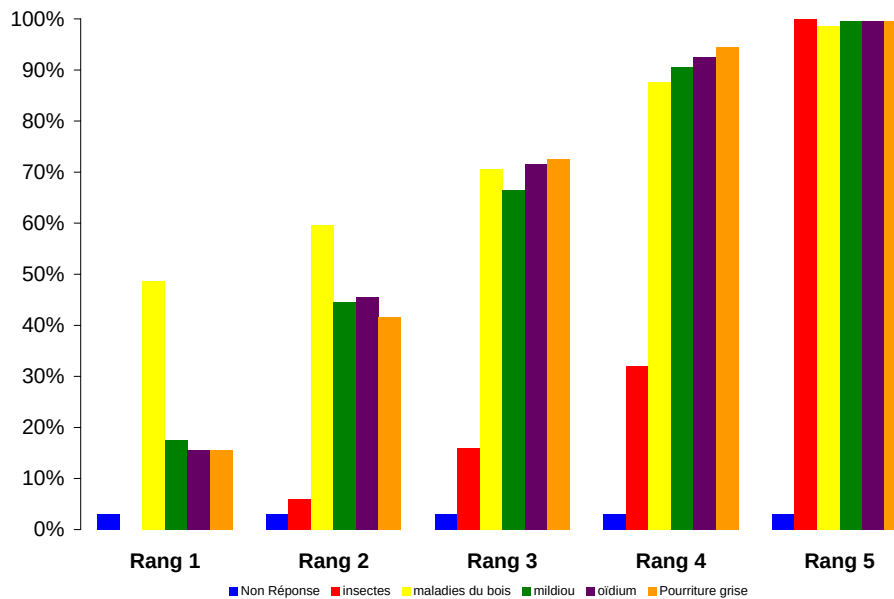


FIGURE A.1 – Fréquences cumulées des réponses à la question : classez les maladies suivantes de la plus inquiétante à la moins inquiétante ?

les viticulteurs sur la maladie qui les inquiète le plus, ils citent en premier lieu les maladies du bois (avec un rang moyen de 2,28) ; viennent ensuite l'oïdium et la pourriture grise *ex æquo*. Le mildiou se classe quatrième, mais la différence de classement entre le mildiou, l'oïdium et la pourriture grise est très mince (2,79 contre 2,73 et 2,74 respectivement). Les insectes sont considérés comme les moins préoccupants, cependant le sondage ne faisait pas explicitement mention de la flavescence dorée. La figure A.1 représente les fréquences de citation cumulées à chaque rang pour chaque maladie.

Les hypothèses selon lesquelles le groupe générique redouterait avant tout le mildiou (p-val. = 0,1) qui cause des pertes quantitatives alors que le groupe prestige redouterait plutôt l'oïdium (p-val. = 0,9) et la pourriture grise (p-val. = 0,9), doivent être rejetées selon le test du χ^2 . Il n'existe donc pas de différence entre les deux groupes dans leurs appréciations de la dangerosité de ces trois maladies.

A.2.4 Tolérance au mildiou et à l'oïdium

L'étude dans le cadre du projet ADD-Vin porte un intérêt particulier au mildiou et à l'oïdium. Interrogés quand à leur tolérance vis à vis de ces deux maladies, les viticulteurs affirment que ce deux maladies sont regardées comme différentes quant à la dangerosité de leurs symptômes, et ce alors même le traitement de ces deux maladies est souvent réalisé au cours des mêmes applications (71% des viticulteurs déclarent systématiquement mélanger anti-mildiou et anti-oïdium). On constate (voir tab. A.6) que l'oïdium est unanimement rejeté sur grappes alors que sa présence est tolérée sur

	feuille (%)	grappe(%)	total(%)
Aucun symptôme	59.7	82.6	71.2
Quelques symptômes	40.2	17.4	28.8
total	100.0	100.0	100.0

l'hypothèse d'indépendance entre l'oïdium feuille et l'oïdium grappe est rejetée selon le critère du test χ^2 : (p-value = $6,3 \times 10^{-4}$)

(a) Tolérance à l'oïdium

	feuille(%)	grappe(%)	total(%)
Aucun symptôme	8.7	57.3	66.0
Quelques symptômes	91.3	42.7	134.0
total	100.0	100.0	100.0

l'hypothèse d'indépendance entre le mildiou feuille et le mildiou « grappe » doit être rejetée selon le critère du test χ^2 : (p-value = $1,3 \times 10^{-13}$)

(b) Tolérance au mildiou

TABLE A.6 – Quel niveau de présence acceptez-vous ?

feuilles à des degrés divers^c Au contraire 87% des viticulteurs admettent tolérer quelques symptômes de mildiou en cours de saison. Quatre agriculteurs ont même déclaré accepter un intensité de 100% en cours de saison, voir même des défoliations en fin de saison. Ces niveaux d'acceptation n'expliquent pourtant pas le nombre moyen de traitements contre le mildiou et contre l'oïdium^d. Il faut donc considérer que si la présence de ces deux maladies est tolérée, cette tolérance se fait *a posteriori* et n'entre pas en jeu dans la construction des objectifs de protection.

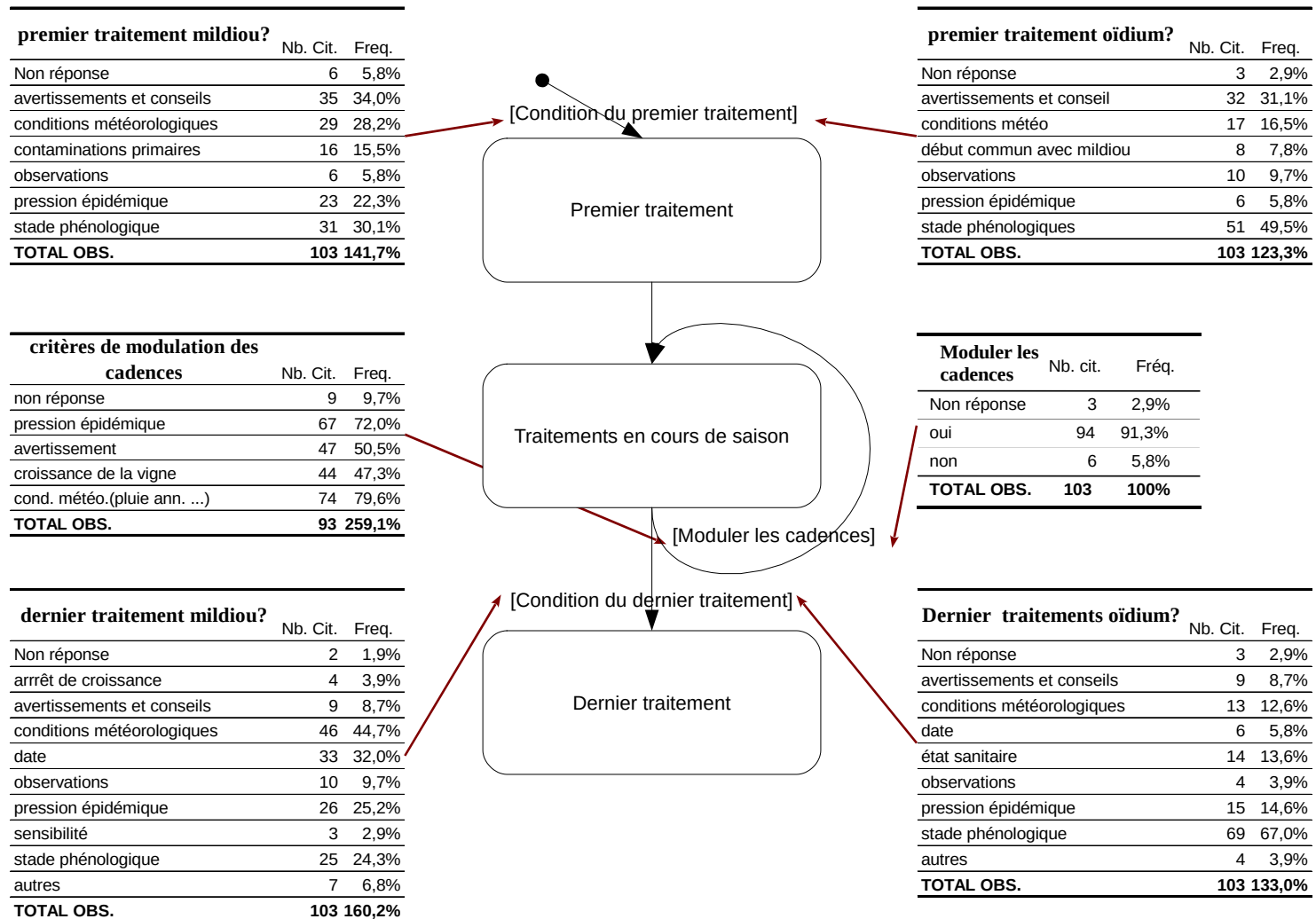
A.2.5 Stratégies de protection contre le mildiou et l'oïdium

L'enquête préliminaire menée par pierre Marandet (Marandet, 2006) a permis de produire un canevas des critères de décision pour les applications phytosanitaires. Les stratégies des quatre exploitations du réseau ADD-Vin ont été modélisées en Statechart avec la méthodologie présentée au chapitre 4, ces modèles sont inclus en annexe D. On a élaboré à partir de ces quatre exemples, un canevas simple de prise de décisions tactiques contre le mildiou et l'oïdium en cours de saison. Le sondage cherchait à connaître les critères utilisés par les viticulteurs pour commencer, renouveler et terminer leur protection, conformément au canevas. Les questions sur les critères de premier et dernier traitements du mildiou comme de l'oïdium, étaient des questions ouvertes. Les réponses ont été re-codées. La figure A.2 représente les différents critères utilisés.

Cette figure (fig. A.2) met en évidence l'importance des avertissements agricoles dans les deux cas (oïdium et mildiou) dans le départ de la protection et le renouvellement des applications. Les stades phénologiques sont plutôt utilisés comme critères de début et de fin. On constate que la protection anti-oïdium est plus systématique puisque le commencement comme l'arrêt des traitements dépendent en priorité d'un stade phénologique (49% et 67%) là où les décisions de traitement mildiou sont liées à des facteurs plus conjoncturels (évaluation de la pression épidémique ou des conditions météorolo-

c. La question portant sur la tolérance au mildiou sur grappe est quelque peu biaisée puisque les viticulteurs étaient interrogés à propos des grappes touchées sans perte.

d. les test du χ^2 donnent dans chaque cas (tol. Mf/nbr. Moy tM; tol. Mg/nbr. Moy tM; tol. Of/nbr. Moy tO; tol. Og/nbr. Moy tO) p-value > 0,3.



La question « Sur quel(s) critères modulez-vous votre cadence ? » pouvait donner lieu à plusieurs réponses.

FIGURE A.2 – Critères cités comme déterminants la décision de traitement

giques). D'une manière générale, les décisions liées au mildiou semblent basées sur un cocktail de facteurs alors que les décisions de traitement oïdium sont largement monofacteur. Cela semble indiquer que le mildiou est mieux connu que l'oïdium permettant un pilotage plus fin de la protection.

En ce qui concerne la modulation des cadences, 91% des viticulteurs déclarent ne pas traiter strictement en terme de cadence de renouvellement des traitements. Les principes de l'agriculture raisonnée sont donc bien entrés dans les mœurs.

Remarque : *Pour autant la question « Sur quel(s) critères modulez-vous votre cadence ? » ne permet pas de déterminer si la modulation se fait par ajout de traitements sur un programme minimum ou plutôt par l'allègement d'un programme « chargé ». D'un point de vue générale, cette section de l'étude devrait être approfondie pour permettre de faire émerger les critères décisionnels conditionnant le nombre de traitements contre le mildiou et l'oïdium.*

Concernant la manière dont sont préparés les programmes de traitements, 19% des viticulteurs interrogés se déclarent autonomes, 72% se font aider par un conseiller et 7% délèguent cette tâche à leur conseiller.

Du point de vue de la mise en oeuvre, les deux maladies sont le plus souvent systématiquement associées, on l'a déjà évoqué, mais parmi les 26% de viticulteurs qui ne font pas d'association systématique, il n'en est aucun qui déclare ne jamais associer les traitements anti-mildiou et anti-oïdium. Ce point est important pour nos travaux puisqu'il s'agit pour nous de proposer une stratégie opérationnelle de décision contre l'oïdium et le mildiou.

Remarque : *Le nombre moyen de traitements anti-mildiou et anti-oïdium (saison 2004 à 2006) est respectivement de 6.9 et 6.19 pour le groupe déclarant ne jamais dissocier les traitements, ces différences pourraient sembler paradoxales si l'on ne considère pas que la protection contre le mildiou est maintenue plus tardivement que la protection anti-oïdium. Autre point important vis à vis de notre approche parcellaire du raisonne-*

ment de la stratégie phytosanitaire : seuls 22% des viticulteurs déclarent ne pas traiter mildiou et oïdium de la même manière sur toutes leurs parcelles, contre 77% qui traitent l'intégralité de leurs parcelles une fois le pulvérisateur sorti. On a donc interrogé les viticulteurs sur le temps qu'ils mettent pour traiter l'ensemble de leurs exploitations. 59% d'entre eux disent mettre de 1 à 2 jours pour traiter l'exploitation et 32% de 2 à 3 jours. Seul 4% peuvent traiter l'ensemble de l'exploitation en moins d'une journée. Ce constat impose pour la suite de nos travaux concernant la mise en oeuvre de stratégies parcellaires étendues à l'exploitation, de disposer d'un système de gestion de la logistique des chantiers permettant de calculer rapidement la faisabilité d'un travail dans un temps donné (Naud et al., 2008).

Avec cette enquête, on souhaitait savoir comment était mobilisée l'information parcellaire et comment elle était exploitée. 99% des viticulteurs effectuent des observations dans leurs parcelles, 58% font des observations spécifiques de l'état sanitaire, tandis que 40% couplent leurs observations avec une autre activité. Ces observations ne servent pas à prendre une décision, mais permettraient pour 61% des viticulteurs interrogés, un

contrôle de l'efficacité des traitements (voir tab. A.7(b)). L'approche que nous présentons en section 3.4 prend largement le contre-pied de telles pratiques, puisqu'il s'agit de faire peu d'observations mais décisives et visant à renforcer lorsque nécessaire un nombre minimal de traitements obligatoires. On le voit tab. A.7(b), seuls 5% des viticulteurs utilisent les observations de cette manière. Pour ce qui est de la stratégie d'observation c'est à dire le choix des parcelles observées, on constate que c'est un choix à la fois sécuritaire (cf. tab. A.7(a)) : « toutes » 47% et « parcelles sensibles » 52%, mais qui dans le second cas est également un choix économe en temps d'observation puisqu'il permet de suivre l'évolution des épidémies là où elles sont le plus aisées à suivre, cela évite la sous estimation d'une infestation, mais peut entraîner des traitements non justifiés au regard de la situation sanitaire du reste de l'exploitation. Ce point constitue l'un des sujets de recherche que nous n'avons pas pu aborder au cours de cette thèse.

	Nb. cit.	Freq.(%)		Nb. cit.	Freq.(%)
N.R.	1	1,0	N.R.	4	3,95
toutes	48	46,6	valid. l'effic. du prog.	63	61,2
parcelles sensibles	54	52,4	alléger le prog.	31	30,1
témoins non traités	3	2,9	renforcer le prog.	5	4,8
échantillonnage cépage	15	14,6	TOTAL OBS.	103	
échantillonnage îlot	28	27,2	<i>les items ont été re-codés</i>		
autre	3	2,9			
TOTAL OBS.	103	147,6			

réponses multiples autorisées, 2 max.

(a) Quelles parcelles observez-vous ?

(b) D'après votre expérience, ces observations vous permettent le plus souvent de : ?

TABLE A.7 – Stratégies d'observation des maladies et leurs utilisations

L'autre source d'information testée dans ce sondage concernait les bulletins d'avertissement. L'ensemble des viticulteurs interrogés déclaraient lire des revues viticoles et recevoir un ou plusieurs bulletins d'avertissement. L'hypothèse d'indépendance entre le nombre cumulé de traitement annuel moyen (2004-2006) et le type de bulletin agricole mobilisé, ne peut être rejetée au sens du test du χ^2 (p-value = 0,57). Si un tiers des personnes interrogées déclarent recevoir un bulletin d'information de leur fournisseur, et un autre tiers disent utiliser les bulletins de la Chambre d'Agriculture de Gironde (CA33), il est à noter que les bulletins les plus utilisés sont les bulletins de l'opérateur historique : SRPV 67% (voir tab. A.8).

Dans cette thèse nous avons fait le choix d'explorer les possibilités de réduire le recours au phytosanitaire par l'augmentation du raisonnement des traitements et un recours accru à l'information. Une autre piste techniquement plus simple consiste à réduire les doses, plusieurs travaux sont menés dans ce sens à ce jour. On souhaitait évaluer l'ampleur de cette pratique chez les viticulteurs. Il s'agit d'une pratique très répandue (68%), principalement mise en oeuvre par la fermeture de certaines buses (46%) ou par baisse de la concentration en dessous des doses homologuées (37%). Néanmoins seuls 14% des viticulteurs pratiquent les réductions de dose de manière systématique, 53% déclarent le pratiquer en début de végétation et 32% en fin de saison (réponses multiples autorisées).

	Nb. Cit.	Freq.(%)
N.R.	4	4,3
Chambre Agri. 33	26	28,0
ITV	9	9,7
SRPV	53	57,0
agro-fourn.avec ctrt	31	33,3
agro-fourn. sans ctrt	5	5,4
conseiller privé	28	30,1
Autre	12	12,9
TOTAL OBS.	93	180,6

réponse multiple autorisée : (6 maximum).

TABLE A.8 – Quels bulletins d'information concernant la protection du vignoble recevez-vous ?

A.2.6 Protection contre la pourriture grise

En terme de protection contre la pourriture grise, cette étude indique que malgré le coût des préparations anti-pourriture (*Botrytis cinerea*), 91% de viticulteurs appliquent une protection contre cette maladie. Cette protection n'est adaptée en fonction de parcelles que dans 21% des cas alors que 69% des viticulteurs protègent l'ensemble de leurs parcelles. En terme de stratégie à proprement parler, deux stades techniques^e sont privilégiés contre la pourriture grise, le stade A (chute des capuchons floraux) et le stade C (début à mi-véraison).

Stade.	Nb.cit.	Freq.(%)
N.R.	19	18,4
A	55	53,4
B	27	26,2
C	62	60,2
D	10	9,7
total obs.	103	168

question à choix multiple les pourcentages sont calculés sur le nombre de questionnaires.

TABLE A.9 – Quels sont les stades auxquels vous traitez la pourriture grise ?

Les pratiques relatives aux traitements des autres maladies cryptogamiques, du bois ou au ravageurs, n'ont pas été traité par cette étude, qui souhaitait se focaliser sur les déterminants de pertes quantitatives de récoltes du aux principales maladies fongique.

A.2.7 Connaissance et choix des phytopharmaceutiques

En matière de produit actif à proprement parler, les viticulteurs déclarent dans 61% des cas connaître le mode d'action de tous leurs produits, ou de la plupart (39%). La connaissance des matières actives est un peu moins bonne puisque 47% des viticulteurs

e. Il s'agit ici des stades techniques définis pour le traitement de la pourriture grise et non de stades phénologiques de [Baggiolini \(1952\)](#)

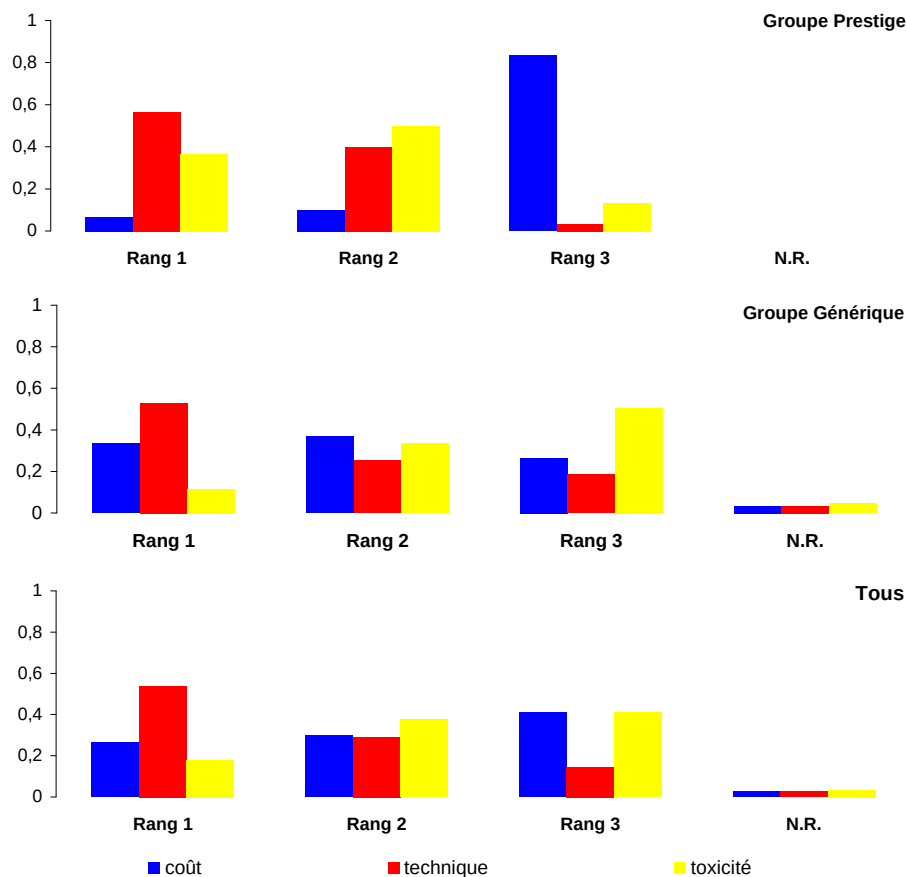


FIGURE A.3 – Distributions des critères de choix de produits selon les préférences des viticulteurs et selon le groupe d'appartenance.

connaissent la matière active de chacun de leurs produits et 49% de la plupart (4% déclarent ne pas connaître les matières actives). Les approvisionnements sont fait à la morte saison soit en totalité (29%) soit en majorité (54%), les autres viticulteurs s'approvisionnant au fur et à mesure en saison (12%) ou sur la base d'un contrat de fourniture (5%). Les critères de choix de produits phytosanitaires sont ordonnées avec des priorités différentes selon l'appartenance du viticulteurs au groupe prestige ou au groupe générique (indépendance rejeté par le test du χ^2 (p-value=0,01)). La figure A.3 illustre ce résultat.

A.2.8 Nombre de traitements anti oïdium et anti mildiou

Ayant précisé comment se construisent les stratégies phytosanitaires, l'enquête permet de préciser la distribution du nombre moyen de traitement anti-mildiou et anti-oïdium, la figure A.4 représente cette distribution. On a calculé médianes et moyennes à partir de la moyenne individuelle de chaque viticulteur sur les trois années d'études. Selon la formule suivante :

$$\frac{\sum_{k=1}^n \frac{\sum_{i=2004}^{2006} Nbr.Trait_{i,k}}{(3)}}{n}$$

où n est le nbre. d'ind.

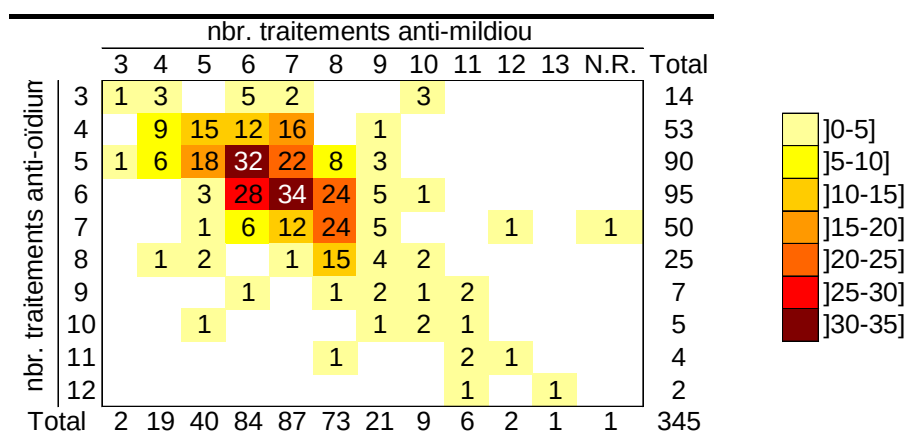


FIGURE A.4 – Tableau de contingence du nombre annuel de traitements appliqués contre le mildiou et l'oïdium entre 2004 et 2006 par les viticulteurs de l'échantillon

Dans l'ensemble de la population, on compte en moyenne 6,87 (l'écart type estimé ($\hat{\sigma}$)=1.22) traitements annuels contre le mildiou et 5,86 ($\hat{\sigma}$ =1.38) traitements anti-oïdium. L'hypothèse d'indépendance du nombre de traitements annuels moyen au groupe {Prestige, Générique} a été testée vis à vis de chacune des deux maladies. L'hypothèse au sens du test du χ^2 peut être rejetée (p -value = 9×10^{-3}). Il existe donc un lien entre l'appartenance d'une exploitation à un des deux groupes d'appellation, qui conditionne le nombre moyen de traitements appliqués contre le mildiou et l'oïdium.

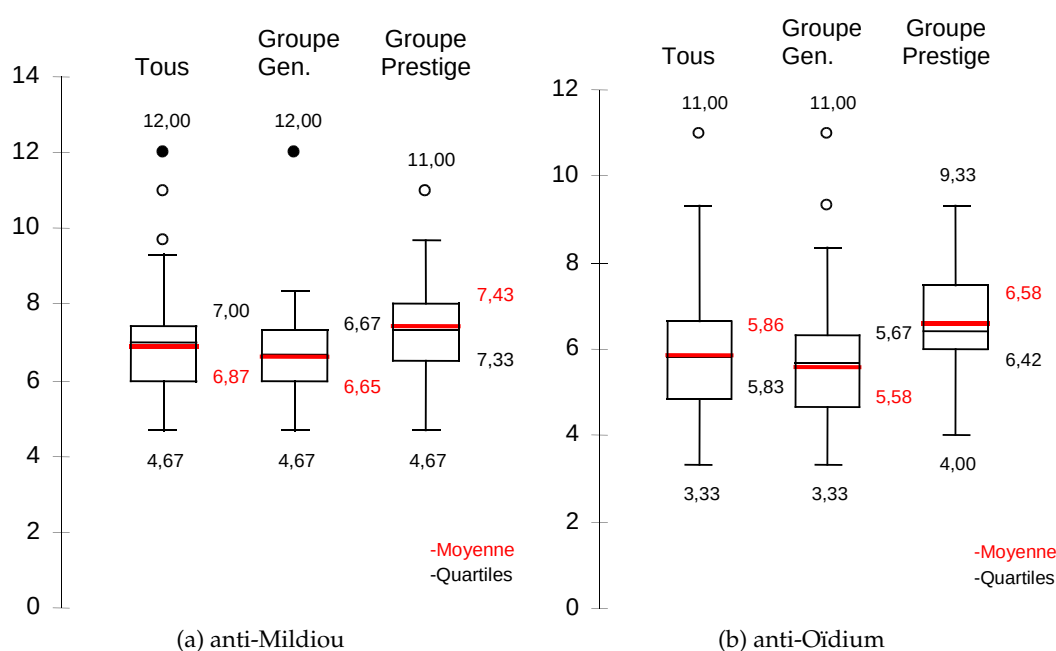


FIGURE A.5 – Boîte de Tuckey du nombre annuel moyen de traitement

A.2.9 Synthèse

On résume les résultats de l'enquête dans le tableau A.10 issue du travail de classification de Marandet (2007).

	Groupe Prestige	Groupe Générique
Caractéristiques	Appellations prestigieuses, grandes exploitations, gérées par des chefs de culture	Appellations génériques, exploitations de petite ou de taille moyenne, gérées par le propriétaire, souvent coopérateur
Contexte agronomique	Effeuillage et ébourgeonnage, vendanges à la main, grand soin apporté au levage	Effeuillage seul ou aucune intervention en vert, vendanges mécanisées
Information mobilisées	Le coût du produit n'est pas un critère orientant le choix	Le coût du produit est un critère orientant son choix
Nombre de traitements mildiou et oïdium	Supérieur à la moyenne de l'échantillon	Inférieur à la moyenne de l'échantillon

TABLE A.10 – Synthèse de l'étude « pratiques phytosanitaires en bordelais ».

Enquête pratiques de protection du vignoble dans le Bordelais

décembre 2006 - mars 2007

INRA de Bordeaux UMRSV projet ADD VE

1. Questionnaire n°

Caractéristiques générales de l'exploitation

2. A quelle zone géographique appartient votre vignoble?

- ☐ 1. Bordeaux/Bordeaux supérieur
☐ 2. Médoc/Haut-Médoc
☐ 3. Appellation médoc communale
☐ 4. Graves
☐ 5. Pessac-Léognan
☐ 6. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

3. Si 'Autre', précisez :

4. Sur quelle commune est situé le siège de l'exploitation?

5. Quelle est la superficie, en Ha, de votre vignoble?

6. Êtes-vous coopérateur?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

7. Votre système de production relève de ?

- ☐ 1. la viticulture conventionnelle
☐ 2. la viticulture biologique
☐ 3. la biodynamie

8. Vous êtes : ?

- ☐ 1. propriétaire exploitant ☐ 2. directeur technique
☐ 3. chef de culture

9. Qui prend les décisions relatives à la protection du vignoble?

- ☐ 1. vous même ☐ 2. une autre personne

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

10. Si 'une autre personne', précisez :

Contexte agronomique

11. Quelle est la densité de plantation dominante sur votre exploitation (ceps/Ha)?

- ☐ 1. <4000 ☐ 2. 4000 à 8000 ☐ 3. > 8000

12. Si la densité de plantation est inférieure à 8000 ceps/Ha, vos parcelles sont-elles en majorité enherbées?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

La question n'est pertinente que si densité plantation # "> 8000"

13. Pourquoi avez-vous enherbé?

- ☐ 1. réduction de la vigueur
☐ 2. réduction de l'utilisation d'herbicides
☐ 3. amélioration de la portance
☐ 4. réduction de l'érosion
☐ 5. réduction des coûts
☐ 6. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (5 au maximum).

La question n'est pertinente que si enherbement = "oui"

14. Si 'autre', précisez :

La question n'est pertinente que si enherbement = "oui"

15. Vous pratiquez:

- ☐ 1. l'effeuillage ☐ 2. l'ébourgeonnage

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

16. Vos vignes sont-elles relevées et rognées quand vous traitez?

- ☐ 1. toujours ☐ 2. la plupart du temps ☐ 3. parfois

17. Les vendanges sont réalisées:?

- ☐ 1. manuellement ☐ 2. à la machine à vendanger

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Perception des maladies et risque accepté

18. Avez-vous connu un échec de protection?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

19. Si oui, décrivez le (année, circonstances, dégâts...).

La question n'est pertinente que si echec_protection = "oui"

20. Si non, que pourrait-être un échec (ce qui vous ne satisfait pas)?

La question n'est pertinente que si echec_protection = "non"

21. Classez les maladies suivantes de la plus inquiétante à la moins inquiétante.

1. insectes 2. maladies du bois 3. mildiou
4. oïdium 5. pourriture grise

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Ordonnez 5 réponses.

22. Quel niveau de présence acceptez-vous pour le mildiou sur feuilles?

- ☐ 1. aucun symptôme
☐ 2. quelques feuilles touchées en cours de saison
☐ 3. toutes des feuilles touchées en cours de saison
☐ 4. une défoliation en fin de saison

23. Quel niveau de présence acceptez-vous pour le mildiou sur grappes?

- ☐ 1. aucun symptôme
☐ 2. quelques grappes touchées sans perte de récolte

24. Quel niveau de présence acceptez-vous pour l'oïdium sur feuilles?

- ☐ 1. aucun symptôme ☐ 2. des symptômes

25. Quel niveau de présence acceptez-vous pour l'oïdium sur grappe?

- ☐ 1. aucun symptôme ☐ 2. quelques grappes touchées

26. Combien de fois avez vous traité le mildiou en 2004?

27. Combien de fois avez vous traité le mildiou en 2005?

28. Combien de fois avez vous traité le mildiou en 2006?

29. Combien de fois avez-vous traité l'oïdium en 2004?

30. Combien de fois avez vous traité l'oïdium en 2005?

31. Combien de fois avez vous traité l'oïdium en 2006?

Caractérisation de la stratégie de lutte contre les bio-agresseurs

32. Effectuez-vous des traitements anti-excoriose?

- ☐ 1. jamais ☐ 2. systématiquement ☐ 3. parfois

33. Effectuez-vous des traitements contre la Pourriture grise?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

34. Appliquez-vous le même programme anti-botrytis sur toutes les parcelles de l'exploitation ?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

La question n'est pertinente que si anti-bot = "oui"

35. Sur quel critère constituez-vous vos groupes de parcelles pour lutter contre la Pourriture grise?

- ☐ 1. cépage
☐ 2. localisation (géographique, topologique)
☐ 3. production attendue (qualité, valorisation)
☐ 4. vigueur
☐ 5. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (4 au maximum).

La question n'est pertinente que si différentes_strategies_PG = "oui"

36. Si 'Autre', précisez :

La question n'est pertinente que si différentes_strategies_PG = "oui"

37. Quels sont les stades auxquels vous traitez?

- ☐ 1. A ☐ 2. B ☐ 3. C ☐ 4. D

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

La question n'est pertinente que si anti-bot = "oui"

38. Sur quelle base décidez-vous de votre premier traitement mildiou?

39. Sur quelle base décidez-vous de votre premier traitement oïdium?

40. Sous quelles conditions arrêtez-vous vos traitements anti-oïdium?

41. Sous quelles conditions arrêtez-vous vos traitements anti-mildiou?

42. Modulez-vous la cadence d'application des fongicides que vous utilisez?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

43. Sur quel(s) critères modulez-vous votre cadence?

- ☐ 1. pression épidémique
☐ 2. avertissements
☐ 3. croissance de la vigne
☐ 4. conditions météorologiques (pluie annoncée en fin de rémanence, lessivage)

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

La question n'est pertinente que si cadence = "oui"

44. Effectuez-vous des observations sur vos parcelles?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

45. Ces observations sont-elles:

- ☐ 1. spécifiques ☐ 2. couplées à une autre activité

La question n'est pertinente que si évaluation = "oui"

46. Quelles parcelles observez-vous ?

- ☐ 1. toutes ☐ 2. parcelles sensibles
☐ 3. témoins non traité ☐ 4. échantillonnage cépage
☐ 5. échantillonnage îlot ☐ 6. autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

La question n'est pertinente que si évaluation = "oui"

47. Si 'autre', précisez :

48. D'après votre expérience, ces observations vous permettent le plus souvent de :

- ☐ 1. valider l'efficacité de votre programme
☐ 2. alléger votre programme
☐ 3. renforcer votre programme

La question n'est pertinente que si évaluation = "oui"

49. Traitez-vous le mildiou et l'oïdium de la même façon sur toute vos parcelles ?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

50. Si non, pourquoi ?

La question n'est pertinente que si strategie_parcellaire = "non"

51. Mélangez-vous anti-mildiou et anti-oïdium ?

- ☐ 1. oui, tous ☐ 2. aucun ☐ 3. certains

52. Si 'certains', précisez :

La question n'est pertinente que si couplage_M_O = "certains"

Les informations mobilisées**53. Lisez-vous des revues viticoles ?**

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

54. Recevez-vous des bulletins d'information concernant la protection du vignoble ?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

55. Si oui, lesquels ?

- ☐ 1. CA 33
☐ 2. ITV
☐ 3. SRPV
☐ 4. agro-fourmiture sans contrat
☐ 5. agro-fourmiture avec contrat
☐ 6. conseiller privé
☐ 7. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (6 au maximum).

La question n'est pertinente que si information_technique = "oui"

56. Si 'Autre', précisez :

57. Quelles informations recherchez-vous dans ces bulletins ?

La question n'est pertinente que si information_technique = "oui"

58. Comment construisez-vous votre programme de traitement ?

- ☐ 1. vous-même
☐ 2. accompagné d'un conseiller
☐ 3. vous vous en remettez à votre conseiller

59. Hiérarchisez les critères de choix des produits selon l'intérêt décroissant que leur accordez.

1. coût 2. technique 3. toxicologie

Ordonnez 3 réponses.

60. Connaissez-vous le mode d'action de vos produits ?

- ☐ 1. oui de tous ☐ 2. oui pour la plupart ☐ 3. non

61. Connaissez-vous la composition en matière active de vos produits ?

- ☐ 1. oui de tous ☐ 2. oui de la plupart ☐ 3. non

Mise en oeuvre des traitements**62. Quand et comment vous approvisionnez-vous en produits phytosanitaires ?**

- ☐ 1. la totalité en morte saison
☐ 2. au fur et à mesure en saison
☐ 3. la majorité en morte saison et le reste en saison
☐ 4. sur la base d'un contrat

63. Combien de jours vous faut-il pour traiter l'ensemble de votre exploitation ?

64. Effectuez-vous des réductions de dose ?

- ☐ 1. oui ☐ 2. non

65. Comment est effectuée la réduction de dose ?

- ☐ 1. augmentation de la vitesse d'avancement
☐ 2. fermeture de sorties
☐ 3. baisse de concentration

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

La question n'est pertinente que si reduction_dose = "oui"

66. Les réductions concernant les traitements anti-mildiou et anti-oïdium sont-elles systématiques ou ponctuelles ?

- ☐ 1. systématiques
☐ 2. en début de végétation
☐ 3. en traitement de fin de saison

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

La question n'est pertinente que si reduction_dose = "oui"

Annexe B

RDD2005 pre-Mildium

Objectif : RDD mildiou/oidium basée sur des indicateurs précis

- 1 - permettant une limitation du nombre d'applications fongicides
- 2 - sécurisant l'efficacité dans des situation à forte pression épidémique
- 3 - permettant une combinaison des applications mildiou et oidium
- 4 - susceptible d'évoluer grâce à de nouveaux indicateurs
- 5 - modulable en fonction des possibilités d'obtention des indicateurs

Principe

- 2 traitements obligatoire mildiou : stade **65/69** et stade **81/85**
- 2 traitements obligatoire oidium : période allant des stade **15/17** à **18/20** et stade **65/69**
- 5 traitements facultatifs mildiou
- 3 traitements facultatifs oidium

Des indicateurs déterminent (i) l'opportunité de réaliser les traitements facultatifs (ii) le positionnement des applications

- ❖ Indicateurs parcellaires obtenus par 3 (ou 4) évaluations de la maladie au vignoble

Evaluation	Stade phéno	mildiou	oidium
E0	avant 15/17	feuilles	
E1	15/17	feuilles	
E2	18/20	feuilles	
E3	77	feuilles	grappes

- ❖ Indicateurs de pression parasitaire locale (mildiou)

- ❖ Prévision météorologique

Description

stade BBCH

E0	15/17
T0	T1

	info mildiou locale ¹ +	
E0 (M)	M+	M-
	M si PA	/

M : Traitement mildiou
O : Traitement oidium
PA : pluie annoncée

E1	18/20
T1	T2

E1 (O/M)	M++	M+	M-
	infoM+	infoM-	infoM+
O-	MO 15/17	MO si PA (Si P=0 alors O 18/20)	O 18/20
O +			
O ++	MO 15/17		O 15/17

O_g : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées <2%
O₊ : 2%>= fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées < 10%
O₊₊ : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées >= 10%
infoM₊ : taches de mildiou dans la zone
infoM₋ : absence de taches de mildiou dans la zone
M₊₊ :
M₊ :
M₋ :

E2	65/69
T2	T3

E2 (O/M)	M++	M+	M-
	infoM+	infoM-	infoM+
O +	M 18/20	M si PA	/
O ++	MO 18/20		O 18/20

O₊ : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées < 10%
O₊₊ : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées >= 10%
infoM₊ : taches de mildiou dans la zone
infoM₋ : absence de taches de mildiou dans la zone
M₊₊ :
M₊ :
M₋ :

73/75	77
T3 + 10-14j	T4

E2(M) / E1(O)	M++	M+	M-
	infoM+	infoM-	infoM+
O-	M T3+10-14j	M si PA	/
O +			
O ++	MO T3+10-14j		O T3+10-14j

O_g : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées <2%
O₊ : 2%>= fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées < 10%
O₊₊ : fréquence de ceps présentant des feuilles oidiées >= 10%
infoM₊ : risque régional élevé
infoM₋ : risque régional modéré
M₊₊ :
M₊ :
M₋ :

E3	81/85
T5	T6

E3 (O/M)	M++	M+	M-
	infoM+	infoM-	infoM+
Og -	M (E3)	M si PA	/
Og +	MO (E3)		O (E3)

O_g : fréquence de grappes oidiées < 20%
O_g + : fréquence de grappes oidiées > 20%
infoM₊ : risque régional élevé
infoM₋ : risque régional modéré
M₊₊ :
M₊ :
M₋ :

TABLE B.1 – Documentation de la Règle De Décision (RDD) Mildium pour l'expérimentation 2005

Annexe C

Version initiale du protocole de recueil de connaissance décembre 2005

Méthodologie du recueil du savoir des experts

Version de Travail 1.1

Bertrand Léger

13 décembre 2005

Contents

1 Objectifs du document :	2
1.1 Présentation de la démarche expérimentale menée dans le cadre de l'action PIC.	2
1.2 Objectifs de la méthode de recueil	2
2 Recueil :	3
2.1 L'entretien avec support	3
2.1.1 Définition du diagramme	3
2.1.2 diagramme admis	4
2.2 Jeux en groupe	5
2.2.1 type de Jeu 1	5
2.2.2 type de Jeu 2	5
2.3 Outils utilisés	6
3 Déroulement Organisation	6
3.1 intervenants	6
3.2 phases	7
3.2.1 phase 1	7
3.2.2 phase 2	7
4 Critiques	8

1 Objectifs du document :

La thèse (CEMAGREF-INRA) de Bertrand Léger porte sur la modélisation mathématique de règles de décision pour le traitement de l'oïdium et du mildiou de la vigne. Ces règles, économes en nombre de traitements, ont été conçues dans le cadre d'une protection intégrée des cultures (PIC). Il convient dans la première phase de ce travail de recueillir les connaissances des experts, et en premier lieu celles des experts ayant conçu les règles en question.

1.1 Présentation de la démarche expérimentale menée dans le cadre de l'action PIC.

Expérimentation de plein champ depuis 2003 dans deux régions viticoles différentes. Les équipes menant ces expériences sont différentes : l'une appartient à L'INRA de Bordeaux, département SPE, (UMR Santé Végétale) l'autre à l'INRA de Montpellier, département EA (UMR Système).

En 2005, les démarches expérimentales ont divergés. L'équipe de Montpellier souhaitait acquérir plus de données sur les règles élaborées les années précédentes, tandis que l'équipe de Bordeaux testait une nouvelle version des règles de décision.

En outre, à Bordeaux, cette démarche expérimentale est conduite dans « l'action » et grâce à l'expérience des experts : les règles décrites en début de campagne sont complétées en cours d'expérimentation lorsque des cas de figure non prévus émergent. Les coûts d'expérimentation imposent ce dispositif expérimental : 4 parcelles = 4 répétitions par an seulement.

1.2 Objectifs de la méthode de recueil

Ce résumé sommaire, issu d'entretiens préparatoires, nous permet d'envisager un protocole de collecte de connaissances visant les objectifs suivants.

- Mettre en évidence l'existence d'un cadre de référence commun entre les différents experts travaillant sur ce projet. Les compétences sont réparties mais un minimum d'unité et de consensus doit être trouvé pour que les informations collectées justifient du qualificatif « d'expertise collective » et/ou de « savoir scientifique et technique ».
- La méthode a pour objectif la réalisation de modèles de connaissances « intermédiaires », capables d'assurer la médiation entre des pathologistes concepteurs de règles et des mathématiciens modélisateurs. A partir de ces « objets intermédiaires », des modèles mathématiquement spécifiés et calculables seront élaborés, à des fins de transfert de connaissance et de validation, détaillés dans d'autres documents.
- L'identification des points de divergence est utile dans le cadre de la démarche mathématique que nous souhaitons mettre en œuvre par la suite, ces développements seront faits dans le cadre d'une information incertaine. Recueillir au plus tôt et expérimentalement ces niveaux d'incertitude permettra d'éviter en partie l'arbitraire dans l'attribution des valeurs d'incertitude lorsque seront introduits les outils de la logique floue.

- Permettre aux experts d'explorer des scénarii inédits afin de formuler de nouvelles hypothèses permettant de parvenir à l'élaboration d'une règle 2006 pour le traitement du mildiou et de l'oïdium et du protocole d'expérimentation pour la valider.

2 Recueil :

Deux types de modes de recueil sont à retenir :

L'entretien avec support : Une thématique générale est abordée au cours d'une séance d'une heure environ. Les points d'éclaircissement particuliers sont abordés au fil de la discussion avec l'expert.

Les jeux sur scénario : Utilisant une version de travail d'un diagramme d'états représentant le modèle, un scénario est proposé aux experts afin de le compléter et de valider le modèle. Un scénario est une suite choisie d'états, c'est à dire un chemin particulier dans le diagramme d'états.

D'autres modes de jeux seront éventuellement conçus dans les prochains mois (d'ici fin février 2006)

2.1 L'entretien avec support

2.1.1 Définition du diagramme

L'objectif de la méthode de recueil de données est d'établir un modèle de la règle de décision sous la forme de diagramme de type Statechart (=diagramme d'états).

Un diagramme sera réalisé à partir des entretiens. Un « diagramme d'états » consiste en une combinaison d'automates. Un automate (ou machine à nombre fini d'états, usuellement appelée machine à états finis, finite state automaton) consiste en un ensemble d'états liés par des transitions. Une transition entre deux états est un « événement », une transition peut donner lieu à une « action » éventuellement soumise à une ou plusieurs « conditions ».

La construction d'un automate présentant la logique globale du raisonnement et des décisions successives lors de la campagne est l'objectif premier. (D'autres automates permettront de préciser différents détails (ressources nécessaires, sources d'information, logistique expérimentale, etc.))

Le diagramme prendra deux formes : formelle et qualitative.

- Le Format Qualitatif doit être intelligible pour l'interviewer, Bertrand Léger, comme pour les experts interviewés.
- Le Format Formel est la première mouture du modèle mathématique.

La forme qualitative permet de questionner les experts, c'est un graphique orienté communication et recueil de connaissances. La version formelle est plus systématique, elle a un objectif calculatoire (elle doit pouvoir à terme être « compilée » par un interpréteur).

Le recueil des informations se fera séquentiellement auprès des divers experts pour permettre de mettre en évidence les points de convergence et de divergence entre ces derniers. Au terme de ce processus on aura un modèle avec des éléments certains

et d'autres moins établis. Pour construire ce modèle chaque élément de type : État, Transition, Condition, Événement, Variable, est associé à une valeur de Consensus.¹

Un élément_x est associé aux propriétés suivantes

- $\text{type} \in \text{Class}_\alpha \rightarrow \text{Classes}$
- $[\text{valeurQualitative}^0 \dots \text{valeurQualitative}^n] \rightarrow \text{Discours}$
- $\text{valeurFormel} \rightarrow \text{SemantiqueStatechart}$
- $\text{proprietaire} \rightarrow \text{Element}_{[1..x..k]} \in \text{Modele}$
- $[\text{cite}_x^0 \dots \text{cite}_x^n] \rightarrow R \in [0..1]$
- $\text{Consensus}_x^n \rightarrow R \in [0..1]$

1 : L'identifiant d'un élément est la conjonction d'un type, d'une valeur Formelle et d'un propriétaire Nb : propriétaire peut être nul cela implique que l'élément appartient au modèle.

2 : L'ensemble des éléments possibles existe dans le modèle. Un élément n'apparaît dans le diagramme qu'à partir du moment où il est cité une fois dans un entretien

Un diagramme est défini par rapport à son modèle et l'« index » de l'entretien à l'issue duquel est reconstruit le modèle :

$$\text{Diagramme}_n \xrightarrow{\text{Modele}_n} \text{Diagrammes}$$

Un diagramme d'état qualitatif préliminaire a été établi à partir de l'entretien réalisé le 25/11/2005 avec Laurent Delière et Philippe Cartolaro. Ce sera le Diagramme_0

4 experts sont interrogés, chacun le sera 2 fois. Les informations tirées d'un entretien permettent d'ajouter ou de renforcer les éléments du modèle $\text{info}_x \Rightarrow \text{element}_x$

Le niveau de consensus s'exprime comme une fraction. Ainsi pour chaque information citée on a :

$$\text{Consensus}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{cite}_x^i}{n}$$

« n » s'incrémente à chaque entretien et cite_x^n représente l'élément « x » du modèle en « n » reporté sur le diagramme.

Les experts sont confrontés à chaque entretien à la version du diagramme admis.

2.1.2 diagramme admis

Un diagramme admis est établi à chaque fois que l'ensemble des experts a été interviewé. On peut définir le diagramme admis de la manière suivante :

$$\text{valeurQualitative}_x^n \xrightarrow{\text{element}_x} \text{Diagramme}_n$$

$$\text{element}_x \in \text{element}_k \in \text{Modele}$$

on a : $\text{info}_x^n \in \text{DiagrammeAdmis}^n$ ssi

$$\text{info}_k^n \in \text{DiagrammeAdmis}^n \text{ et } \text{Consensus}_x = \max \text{Consensus}_z \forall z \in \text{Class}_\alpha; \forall z \in k$$

L'entretien avec un expert se déroulera en 2 parties

¹ rechercher sur nécessité, possibilité et Consensus. Voir IRIT et MIA (Toulouse en somme)

- lors de la première, on travaille sur le diagramme admis, cette phase dure environ une demi heure. L'objectif est de recueillir le consensus des experts, d'observer si le modèle sur lequel tous travaillent est partagé.
- Pour la seconde partie de l'entretien, on change de diagramme, la version précédente ($n - 1$) du diagramme complet est présentée. Il s'agit tout d'abord de reprendre les différences entre le diagramme admis que l'on vient d'éditer et le diagramme complet tel qu'il a été établi à l'issue de la dernière interview. Pour parcourir et questionner ce diagramme on commence par reporter les évolutions proposées dans la première partie de l'entretien. Ce transfert sera fait par l'expert. L'interviewer questionnera la cohérence du diagramme aux vues des derniers ajouts. Cette étape terminée, le questionnement devra explorer des points troubles du graphique, trouver des zones peu explorées, tenter d'approfondir quelques points.

2.2 Jeux en groupe

Les scénarii sont exprimés avec les variables définies dans le modèle. Il s'agit de définir une suite cohérente de valeurs prises par ces variables. Chaque vecteur de valeurs définit un état. Il est possible de construire des états avec une information partielle, c'est-à-dire lorsque les variables n'ont pas forcément de valeur définie².

Construire un scénario, c'est proposer aux experts un enchaînement d'états qui soit crédible afin d'observer la manière dont ils utilisent/mettent en oeuvre le RDD. L'hypothèse étant faite que si l'on propose un état impossible au mieux ils ne pourront pas conclure, au pire ils s'élèveront contre le principe même du jeu et son animateur.

2.2.1 type de Jeu 1

Le premier type de jeu consiste à parcourir le modèle en utilisant comme scénario les conditions climatiques observées en 2003, 2004, 2005. Les états logiquement déduits de la règle seront pré-calculé à partir du diagramme admis sous la forme formelle. Les joueurs n'auront pas le diagramme admis sous les yeux. Les joueurs seront invités à interpréter un autre rôle que le leur, afin de les pousser à envisager des points de vue plus larges que leurs expériences personnelles. Cela devrait faciliter la justification des décisions prises dans la mesure où un rôle différent oblige l'expert à construire un raisonnement plutôt que de n'utiliser que ses réflexes professionnels. Les décisions sont prises par consensus et l'explicitation des positions de chacun, dans le débat menant à ce consensus, doit permettre de dévoiler les détails de la règle et de compléter le modèle. Au terme du jeu, les décisions prises par les experts pendant le jeu seront comparées à l'attendu. Les nouvelles informations pourront être reportées sur le modèle dans la mesure où un consensus a émergé entre les différents experts.

2.2.2 type de Jeu 2

Cette seconde séance de jeu vise à proposer des scénarii de conditions originales dont l'objectif est de valider les zones du graphe non explorées par l'expérimentation.

On tentera ainsi de valider les zones du graphe non explorées par l'expérimentation, et également de préciser l'incertitude sur les seuils de décision ($M+$ versus $M++$, ...).

²Reste à préciser l'articulation entre un état partiel/un hyperplan et un état complet/un point appartenant à l'état partiel/l'hyperplan. Cette appartenance « entière » suffit-elle ou doit-on considérer l'information : « indéfinie » comme une valeur ou non?

Cette étape doit permettre d'identifier clairement les limites du système. En effet certaines combinaisons des valeurs sont incohérentes et impossibles. Identifier ces limites permet d'externaliser les conditions relatives à ces combinaisons aberrantes des valeurs. Ces conditions identifiées, on pourra préciser les Meta conditions du modèle (étape du travail à préciser).

2.3 Outils utilisés

Les séances de travail (Entretiens, Réunion, Jeux) sont enregistrées et sauvegardées au format audio Ogg Vorbis³ Les fichiers sont désignés par le sujet de l'entretien, la date de réalisation de l'enregistrement et s'il y a plusieurs fichiers, le numéro d'ordre est ajouté .

Des notes complémentaires sont consignées dans un cahier de laboratoire au format Inra. Ce cahier doit au moins contenir mention :

- des dates d'entretiens,
- de la préparation de l'entretien, son fil conducteur,
- du type de recueil effectué,
- des participants.
- Les documents supports utilisés ainsi que leurs références et versions.

Les notes en cours d'entretiens figurent dans ce cahier.

Les diagrammes décrits en 2.1.1 et 2.1.2 sont imprimés et les informations complétées en cours d'entretien sont saisies sur du papier transparent.

Une base de vocabulaire est construite dans un fichier tableur. À partir des citations des différents experts. Elle sert à construire les diagrammes et à conserver la diversité de vocabulaire.

Un document de synthèse devra être établi. Pour lier les entretiens avec les diagrammes. Un automate discret sera tiré du diagramme Formel à l'issue de la procédure de recueil.

3 Déroulement Organisation

3.1 intervenants

Nous distinguons trois groupes d'experts :

Le premier groupe est constitué de chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'INRA de Bordeaux. Ils sont à l'origine de la règle que nous allons étudier. Ils ont le second avantage d'être très facilement accessibles. Enfin ils possèdent un savoir aussi bien pratique que théorique sur les règles de décisions étudiées. Ce seront nos Experts principaux.

Groupe 1 :

³Les fichiers audio ne donneront pas lieu à une retranscription intégrale. Ils pourront être édités sur demande d'un ou plusieurs intervenants, par Bertrand léger, dans le cas où des propos hors sujets seraient tenus.

- Pr. Michel Clerjeau
- Philippe Cartollaro
- Lionel Delbac
- Laurent Delière

Le second groupe est constitué des deux chefs de domaine expérimentaux de Couhins et Latresne. Ces sites expérimentaux de l'INRA de bordeaux ont servis à mener les expériences pendant les 3 années. Les chefs de domaines ont été partie prenante de l'expérimentation. Nous les interrogerons donc dans le cadre des jeux.

Groupe 2 :

- ??
- ??

Le troisième groupe est composé des responsables des expérimentations menées à Montpellier. Pour des raisons pratiques il sera plus difficile de rencontrer ces intervenants aussi nous contenterons nous d'effectuer si possible un jeu et des entretiens détaillés de leurs expériences.

Groupe 3 :

- Hector Valdez
- Christian Garry

3.2 phases

Le Recueil se déroule de la manière suivante.

3.2.1 phase 1

Une première série « d'entretiens avec support » avec les acteurs du groupe 1 sert à établir une première mouture du modèle Règle de Décision Mildiou Oïdium 2005

Cette phase 1 a débuté le 5/12/2005 et devrait s'achever vers le : ...

Le détail des passages en phase 1 sera précisé dans le cahier d'expérience.

3.2.2 phase 2

Plusieurs séances de Jeux seront organisées à Bordeaux. Tous les groupes présentés précédemment seront invités.

Pour la phases 3 il est capital que les chefs de domaines (Groupe 3) soient présents et interrogés avec soin. Une attention particulière sera apportée à recueillir leurs opinions en dehors des contraintes d'exploitation. Ces contraintes seront à intégrer par la suite. Pour le moment il s'agit de modéliser la RDD appliquée à une parcelle sans contrainte.

Dans une phase 4, on pourra envisager de recueillir des idées de variantes à la règle " mildium 2005 ", par le jeu.

4 Critiques

olivier - 0. 9 Dans 2.2.1 quel est le but de la comparaison de l'attendu avec l'obtenu à l'issue du jeu? comment valoriser cette information.

bertrand - 0. 9 L'un des aspects intéressants de cette étude est d'observer les divergences entre les experts, de mettre en relief les points de désaccord. Pourtant aucune méthode de mesure du désaccord n'est proposée. N'est pas proposée une méthode de prise en compte des divergences dans les modèles. Ces points seront successivement à éclairer.

olivier - 1. 0 Entre la phase 1 et la phase 2, il est possible de confier pour correction autonome, sans ta présence, les diagrammes qualitatifs à chacun des 4 experts du groupe 1, qui sont priés de ne pas se consulter. La similitude des corrections te donne une image du niveau de consensus.

olivier - 1. 0 Dans la phase 3 jeu, on peut aussi séparer les membres du groupe 1 en deux groupes de décideurs, et comparer leurs avis. Par ex, le groupe 1a joue sur tout un scénario de campagne, puis le groupe 1b vient jouer, sur le même scénario.

olivier - 1. 0 Il faudra pour la réunion du comité de janvier être clair sur la capacité de l'équipe SV à assumer l'explicitation d'éventuelles différences d'interprétation.

Annexe D

Modèles de stratégies phytosanitaires bordelaises

Le Modèle des stratégies phytosanitaire des viticulteur du réseaux [ADD-Vin](#), a été recueillie sous forme d'interview semi dirigé par P. Marandet au cours de son stage de fin d'étude d'ingénieur agricole. P. Marandet a ensuite été interviewer selon la procédure présenté au chapitre 4. Quatre modèles ont ainsi été recueillis. On ne présente ici que le modèle de Monsieur. B. (Les noms des exploitant ont été codé pour l'étude)

D.1 Exploitation M. B

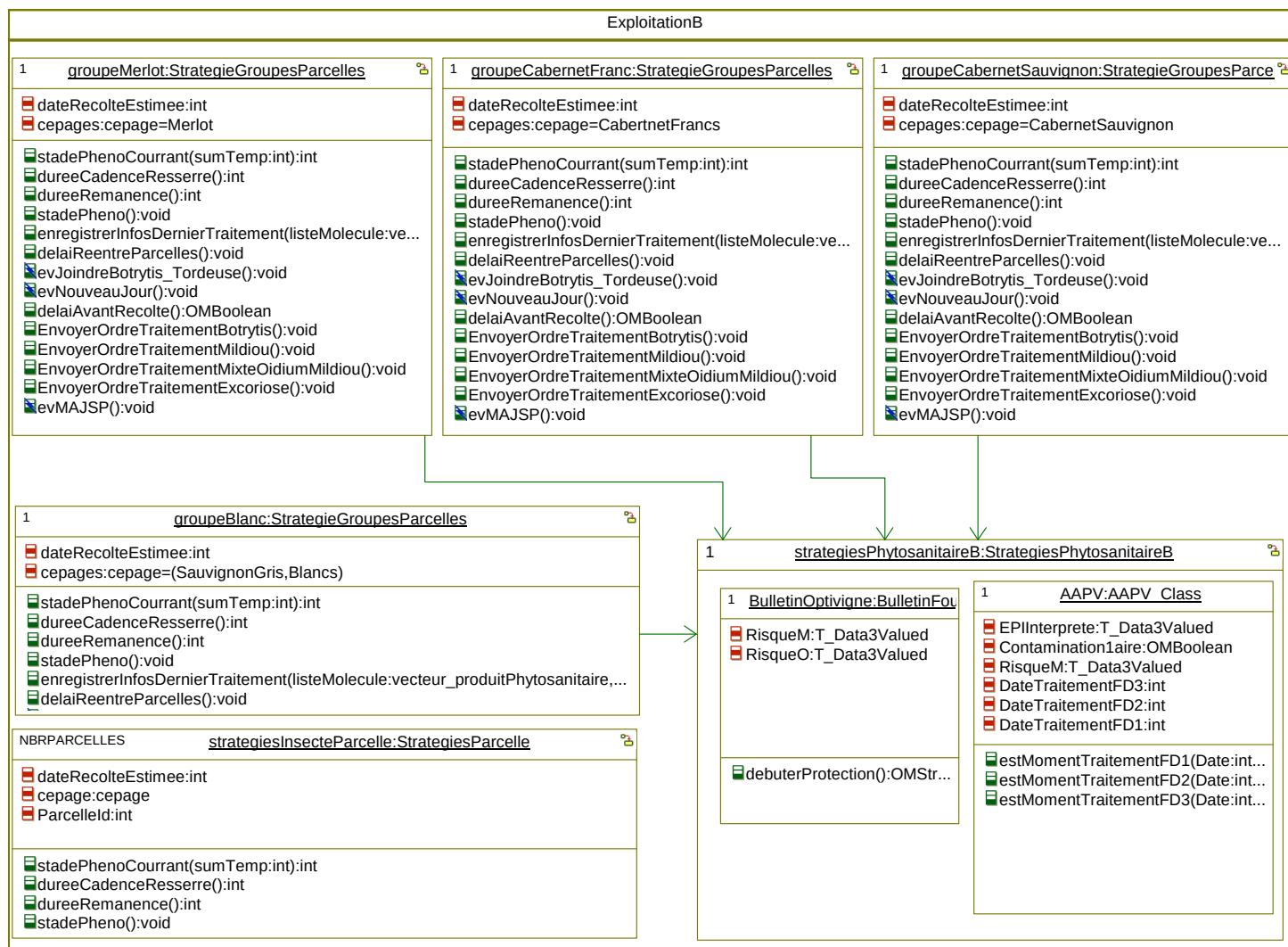


FIGURE D.1 – Le model Décisionnel de l’exploitant utilise 3 classes de raisonnement : à la parcelle, au groupe de parcelles, à l’exploitation.

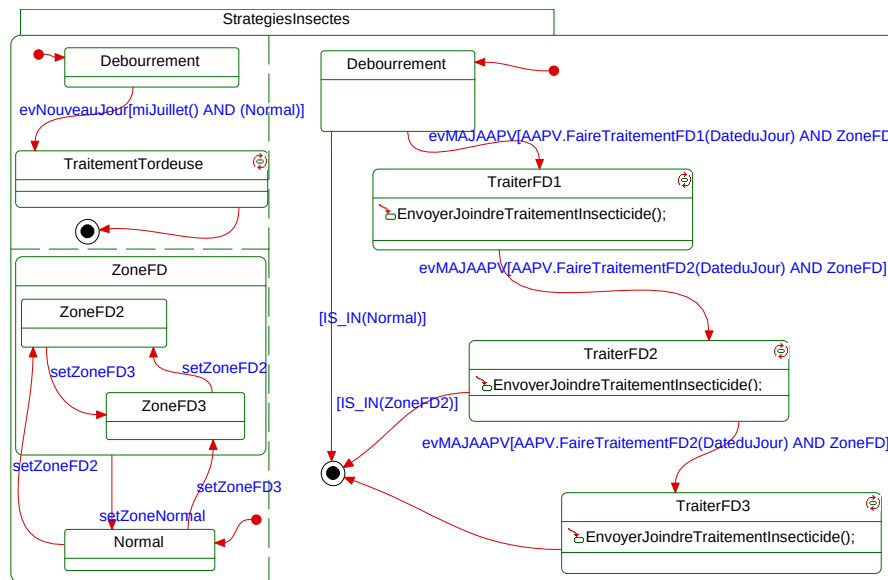


FIGURE D.2 – M. B. gère les applications d’insecticides parcelle par parcelle. Principalement du fait de la Flavesence Dorée.

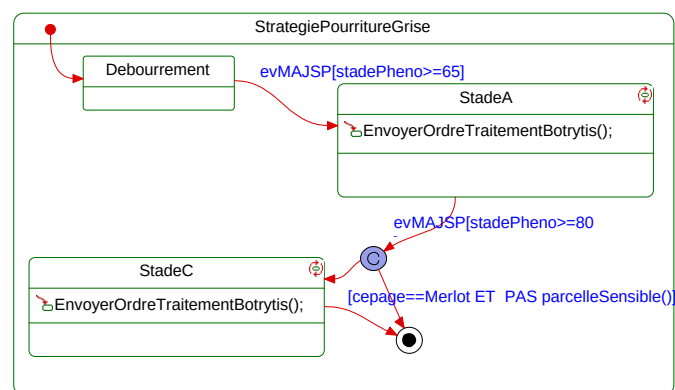


FIGURE D.3 – M. B. Décide ses traitements anti-pourriture grise en fonction du cépage. Il constitue 4 groupes pour adapter les applications.

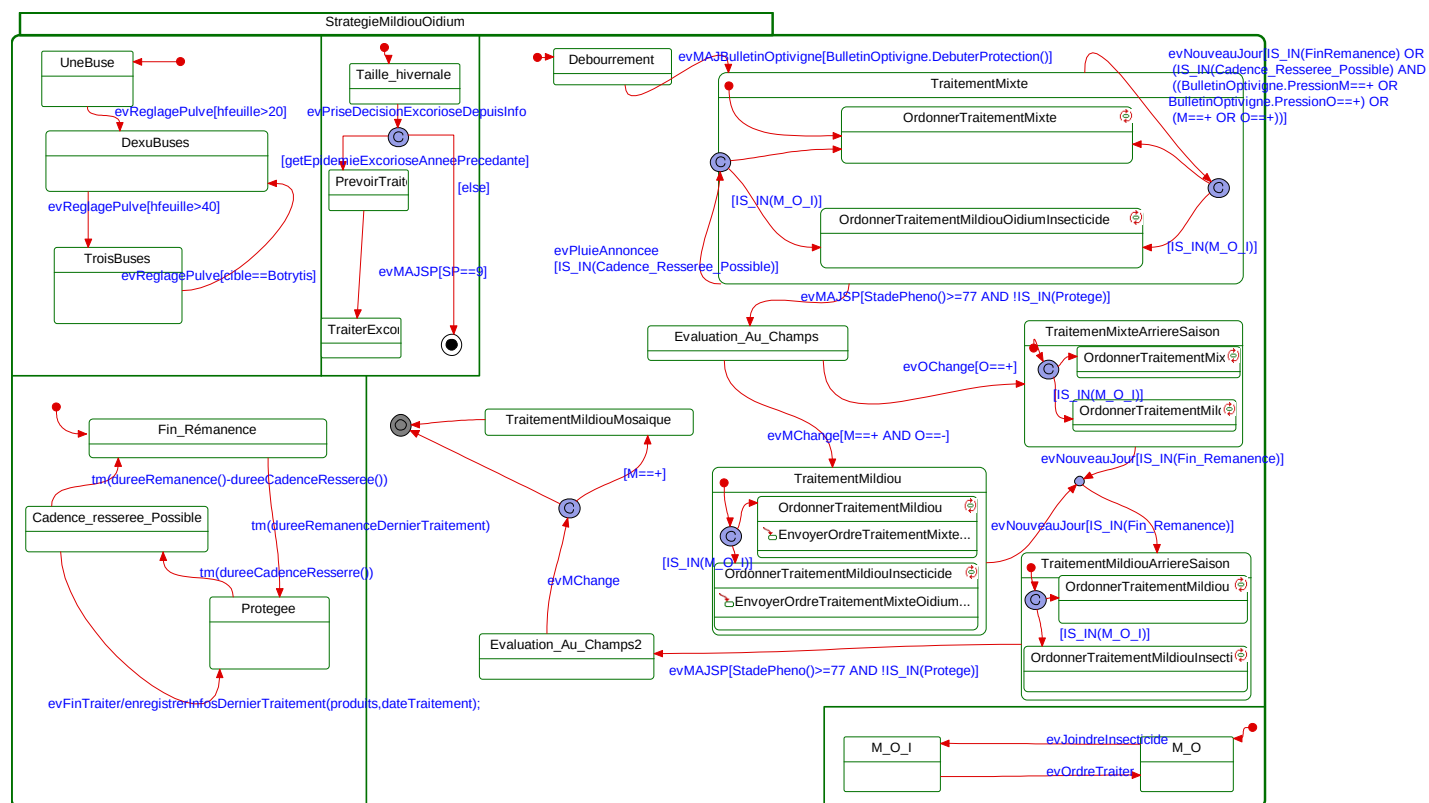


FIGURE D.4 – Le mildiou, l’oidium et l’excoriose sont gérés à l’exploitation.

Annexe E

Donnée sources pour les scénarios de simulation

Plots	Evaluations 2005											
	E1 (10/05)				E2 (25/05)				E3 (28-29/06)			
	Dm		Pm		Dm		Pm		Dm		Pm	
Lat. M	1.3	0	19.0	+	0.7	0	31.4	++	0.0	0	18.0	0
Lat. CS	0.0	0	1.2	0	0.0	0	40.4	++	0.0	0	17.0	0
V.O. M	0.6	0	0.6	0	0.6	0	1.2	0	0.0	0	0.4	0
V.O. CS	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
Pm : Powdery mildew				Lat. : Latresne				M : Merlot				
Dm : Downy mildew				V.O. : Villenave d'Ornon				CS : Cabernet Sauvignon				

TABLE E.1 – 2005 diseases levels and interpreted values at each evaluation date per plot

Plots	Evaluations 2006											
	E1 (04-09*-11**/05)				E2 (22/05)				E3 (29/06)			
	Dm		Pm		Dm		Pm		Dm		Pm	
Lat. M	0.0	0	2.6	+	40.5	+	12.4	+	19.6	0	7.3	0
Lat. CS	0.0	0	0.0	0	47.5	+	2.5	+	49.6	0	0.6	0
V.O. M	0.0*	0	0.0*	0	81.3	++	0.6	0	71.0	+	1.4	0
V.O. CS	0.0**	0	0.0**	0	28.4	+	0.0	0	12.0	0	0.9	0
Pm : Powdery mildew				Lat. : Latresne				M : Merlot				
Dm : Downy mildew				V.O. : Villenave d'Ornon				CS : Cabernet Sauvignon				

TABLE E.2 – 2006 diseases levels and interpreted values at each evaluation date per plot

ILM Change			
Change date	Value	Change date	Value
04/05/2005	+	09/05/2006	+
31/05/2005	0	07/06/2006	0
28/06/2005	+	28/06/2006	+
05/07/2005	0	23/08/2006	0

TABLE E.3 – Evolution of the variable ILM in 2005 and 2006 according to the global downy mildew epidemic risks as reported in the Aquitaine official warning service bulletins

Ref num	Dec date	R.F.	Rain due	in Inputs	Next rain
PRO001-002	11/05/05	y		[11-13]/05/05	12/05/05
PRO003-004	19/05/05	y		[19-21]/05/05	21/05/05
PRO005	25/05/05	n			
PRO006-007	02/06/05	y		[02-03]/06/05	03/06/05
PRO008	16/06/05	n			
PRO010-011	29/06/05	y	01/07/05	[29/06-01/07]/05	29/06/05
PRO013	29/07/05	y	05/08/05	[29/07-05/08]/05	29/07/05
PRO001-002	16/05/06	y	[18-19]/05/06	[16-19]/05/06	17/05/06
PRO003	22/05/06	y	[25-26]/05/06	[22-26]/05/06	23/05/06
PRO004-005	29/05/06	n			
PRO006-007	12/06/06	y	[17-18]/06/06	[12-18]/06/06	13/06/06
PRO008	29/06/06	y	end of week end	[29/06-02/07]/06	02/07/06
PRO009	18/07/06	y	week end	[18-23]/07/06	19/07/06

TABLE E.4 – Records of rain forecasts from treatment request form, values used as simulation input. (The forecast and the following rain were compared showing that the forecasts are issued on average, one day before the rains) ($avg = 1.1; \sigma = 0.83$)

Ref num	Target Dis.	Decision date	Treat. Date	Plot
PRO001	Pm	Wed 11/05	Wed 11/05	V.O. M, Lat. M
PRO002	Dm	Wed 11/05	Wed 11/05	V.O. M, Lat. M
PRO003	Pm	Thu 19/05	Fri 20/05	V.O CS, Lat. CS
PRO004	Dm	Thu 19/05	Fri 20/05	V.O CS, Lat. CS
PRO005	Pm	Wed 25/05	Fri 27/05	Lat. M(10-18)
PRO006	Dm	Thu 2/06	Fri 3/06	V.O. M, Lat. CS, Lat. M
			Mon 13/06	V.O CS
PRO007	Pm	Thu 2/06	Fri 3/06	V.O. M, Lat. CS, Lat. M
			Mon 13/06	V.O CS
PRO008	Pm	Thu 16/06	Fri 17/06	V.O. M(1-9), Lat. CS(1-9), Lat. M
PRO010	Dm	Wed 29/06	Thu 30/06	V.O CS, V.O. M, Lat. CS, Lat. M
PRO011	Pm	Wed 29/06	Thu 30/06	Lat. M(1-9)
PRO013	Dm	Fri 29/07	Thu 4/08	V.O CS, V.O. M, Lat. CS
			Tue 9/08	Lat. M
Pm : Powdery mildew		Lat. : Latresne		M : Merlot
Dm : Downy mildew		V.O. : Villenave d'Ornon		Cs : Cabernet Sauvignon

TABLE E.5 – The treatment requests for the year 2005 the target disease and plots

Ref num	Target Dis.	Decision date	Treat. Date	Plot
PRO001	Dm	Tue 16/05	Wed 17/05	V.O. CS, V.O. M, Lat. M (10-18), Lat. CS (1-9)
PRO002	Pm	Tue 16/05	Wed 17/05	V.O. CS, V.O. M, Lat. M, Lat. CS
PRO003	Dm	Mon 22/05	Wed 24/05	Lat. M (1-9), Lat. CS (10-18)
PRO004	Dm	Mon 29/05	Thu 1/06	V.O. CS, V.O. M, Lat. M, Lat. CS
PRO005	Pm	Mon 29/05	Thu 1/06	V.O. CS, V.O. M, Lat. M, Lat. CS
PRO006	Dm	Mon 12/06	Fri 16/06	V.O. CS, V.O. M, Lat. M, Lat. CS
PRO007	Pm	Mon 12/06	Fri 16/06	Lat. M
PRO008	Dm	Thu 29/06	Sun 30/07	V.O. CS (1-15), V.O. M (1-9), Lat. M (10-18), Lat. CS (1-9)
PRO009	Dm	Tue 18/07	Tue 18/07	V.O. CS, V.O. M, Lat. M, Lat. CS

TABLE E.6 – The treatment requests for the year 2006 the target disease and plots

Com. name	Target dis.	Prod. type	Act.per.	Prop.
bb rsr	Downy mildew	Copper	10	05PRO013
champ flo	Downy mildew	Copper	10	05PRO013
Copper	Downy mildew	Copper	10	06PRO009
fastime	Downy mildew	Curative	12	06PRO003
jalon	Downy mildew	Curative	12	05PRO010
epilog flash	Downy mildew	Systemic	14	05PRO006
option flash	Downy mildew	Systemic	14	05PRO006,06PRO004, 06PRO006,06PRO008
rhodax	Downy mildew	Systemic	14	05PRO002,05PRO004, 06PRO001
sillage	Downy mildew	Systemic	14	05PRO002
valiant flash	Downy mildew	Systemic	14	05PRO010
apanage	Powdery mildew	SBI 1	14	05PRO001,05PRO005
corail	Powdery mildew	SBI 1	14	05PRO001,05PRO007, 05PRO011,06PRO002
legend	Powdery mildew	Quinoxifen	14	06PRO007
natchez	Powdery mildew	Strobilurin	14	05PRO003,05PRO007
stroby df	Powdery mildew	Strobilurin	14	05PRO008,05PRO007, 06PRO005

TABLE E.7 – Product used during the experiments, related to its GrapeMilDeWS product type*, the active period and the treatment proposals in which the product was selected This is the classification as implemented in GrapeMilDeWS, some product may eventually belong to more than one class of product

2005 Lat. M		2006 Lat. M		2005 V.O. M		2006 V.O. M	
4/5	15	4/5	15	4/5	15	9/5	15
24/5	61	28/5	61	1/6	65	29/5	62
2/6	65	6/6	65	2/6	65	4/6	65
20/7	81	21/7	81	22/7	81	18/7	83
28/7	85	1/8	85	29/7	85	4/8	85
2005 Lat. CS		2006 Lat. CS		2005 V.O. CS		2006 V.O. CS	
4/5	15	4/5	15	4/5	15	9/5	15
2/6	65	29/5	62	2/6	60	29/5	62
3/6	69	5/6	65	4/6	65	7/6	65
29/7	85	30/7	81	28/7	81	29/7	81
30/7	86	1/8	85	29/7	85	30/7	86
Pm : Powdery mildew		Lat. : Latresne		M : Merlot			
Dm : Downy mildew		V.O. : Villenave d'Ornon		CS : Cabernet Sauvignon			

TABLE E.8 – Summary of phenology as used in the Simulations. Only the triggering values are shown

Liste des abréviations

A2PV	Appel à Projets Protection Vigne	189
AEF	Automate à États Finis	64
ANR	Agence Nationale de la Recherche	2
ADD	Agriculture et Développement Durable (Programme fédérateur de l'ANR)	2
BIA	UR Biométrie et Intelligence Artificielle	83
BPM	Business Process Management	
CA33	Chambre d'Agriculture de Gironde	236
CEMAGREF	Centre d'Étude du Machinisme Agricole du Genie Rurale des Eaux et Forêts	
CTL	« Computational Tree Logic »	198
DeWS	Decision Workflow System traduction de l'acronyme POD	vii
ERP	Entreprise Ressource Planning	85
$\hat{\sigma}$	l'écart type estimé	239
FCVA	Fédération des Coopératives Viticoles d'Aquitaine	230
GENIAL	Génie Industriel Alimentaire	202
GrapeMilDeWS	Grapevine powdery and downy Mildew Decision Workflow System voir POD contre le Mildiou et l'Oïdium de la vigne (voir Mildium)	vii
oeGrapeMilDeWS	original expert GrapeMilDeWS voir GrapeMilDeWS	159
IFV	Institut Français de la Vigne et du Vin	22
INRA	Institut National de Recherche Agronomique	2
IPM	Integrated Pest Management	vii
ITAP	Information et Technologie pour les Agro Procédés	3
ITK	Itinéraires Techniques (voir Sebillote, 1987b)	35
KE	Knowledge Engineer, Cogniticien en Français	110
χ^2	Test d'indépendance du chi deux : évalue l'indépendance d'une variable à une autre	231
LTL	« Linear Temporal Logic »	198
OAD	Outil d'Aide à la Décision	18
OGM	Organisme Génétiquement Modifié	
OILB	Organisation Internationale de Lutte Biologique et Intégrée contre les Animaux et les Plantes Nuisibles. l'Europe est rattaché à la Sous Région Ouest Paléarctique (SROP)	16
OTELLO	Organisation du Travail Et Langage à Objet	80
PI	Production Intégrée	16
PIC	Protection Intégrée des Cultures	vi
POD	Processus Opérationnel de Décision	vi
PTCTL	« Probabilistic Timed Computational Tree Logic »	200
RDD	Règle De Décision en agronomie	34
RdP	Réseau de Petri	61
SAD	Sciences pour l'Action et le Développement	77

SAU	Surface Agricole Utile.....	2
SC	Statechart.....	66
SED	Systèmes à Évènements Discrets	37
SRPV	Services Régionaux de la Protection des Végétaux.....	31
SV	UMR Santé Végétale (INRA/Enita de Bordeaux).....	2
TCTL	« Timed Computational Tree Logic »	199
UR	Unité de Recherche	83
UMR	Unité Mixte de Recherche	2
UEML	Unified Entreprise Modelling Language approche ontologique basé sur UML 2.0 visant à fournir les méta-concepts de description des systèmes de production.....	86
UML 2.0	Unified Modelling Language (v.2.0)	66
ADD-Vin	projet ADD Vin et Environnement (titre du projet : Quelles interventions publiques et privées pour réduire l'utilisation des traitements phytosanitaires dans le secteur du vin ?).....	2
WP	Work Package	

Table des figures

0.1	Outils d'aide à la conception de procédés à base d'expertise dans une démarche itérative.	5
1.1	Boite de Tuckey du nombre annuel moyen de traitements.	12
1.2	Relation entre bio-agresseurs, dégâts, dommages et pertes	17
1.3	Diagrammes des dynamiques des maladies	24
1.4	Cycle de vie de l'oïdium de la vigne (<i>Erysiphe necator</i>)	25
1.5	Développement d'une épidémie d'oïdium à partir de deux foyers naturels. L'intensité (feuille/ceps) des dégâts observés sur les premiers cepcs contaminés se généralise en intensité moyenne à la parcelle avec un décalage d'une dizaine de jours	26
1.6	La précocité des attaques d'oïdium sur feuilles induit l'intensité des dégâts sur grappes	28
1.7	cycle de vie du mildiou de la vigne (<i>Plasmopara viticola</i>)	29
1.8	Vitesse de germination des spores de <i>Plasmopara viticola</i>	30
1.9	Exemples de formes de conservation hivernale et de formes de reproduction secondaire	32
1.10	Symptômes sur grappes et feuilles causés à gauche par le mildiou et à droite par l'oïdium.	33
2.1	Schéma des composantes d'un pathosystème	43
2.2	Relations entre le comportement complet du Système, le comportement observé et celui du modèle.	49
2.3	Deux types de contrôleur en boucle fermée avec le système	50
2.4	Le problème de contrôle du mildiou et de l'oïdium tel que résolu par le POD Mildium.	53
2.5	L'évolution de l'état d'un SED dans le temps se résume par une séquence d'évènements à partir d'un état initial.	55
2.6	Trois types de SED selon Booth	56
2.7	Deux représentations de Mo un automate de Moore	59
2.8	Deux représentations de My (un automate de Mealy)	60
2.9	Automate de Mealy avec absence de <i>trigger</i> ou d' <i>action</i>	61
2.10	Réseau de Petri (RdP) places transitions sans marquage	62
2.11	L'évolution du marquage d'un RdP représente les changements états.	62
2.12	RdP synchronisant plusieurs processus	63
2.13	Différentes familles de Réseaux de Petri	63
2.14	détails de modèles d'une journée : la préparation du petit déjeuner.	65
2.15	Organigramme sous forme Higraph.	66
2.16	Les quatre types d'états du Statechart	67
2.17	Les actions peuvent être ordonnées à l'entrée, à la sortie ou pendant un état.	68
2.18	Les Pseudostates	70
2.19	quelle priorité pour les transitions ?	71
3.1	Structure et flux du simulateur OTELO	81
3.2	Conduite d'un système de production agricole	84
3.3	Modèle IDEF0/SADT Diagramme A0 d'une exploitation d'élevage bovin	86
3.4	Deux exemples de formalismes utilisés pour modéliser les processus métiers	88

3.5	De l'analyse des périodes risques épidémiques à l'élaboration d'un Processus Opérationnel de Décision	92
3.6	L'intégration de Mildium dans le modèle de l'entreprise agricole	97
4.1	Rounds of interviews.	111
4.2	Main steps of the GrapeMilDeWS process for a cultural season	113
4.3	Details of Stage_4	114
5.1	State diagram : used to check a system's property	130
5.2	Statechart's different kind of states	132
5.3	Pseudo-states	133
5.4	3 Scopes are defines : the system, the neighbourhood, the environment	135
5.5	Four concurrent (simultaneous) functions compose GrapeMilDeWS	136
5.6	GrapeMilDeWS main process: 7 treatment decision stages and 3 observation states.	137
5.7	GrapeMilDeWS active period management is summarised by 4 States	139
5.8	GrapeMilDeWS Stage_0	140
5.9	GrapeMilDeWS Stage_1	142
5.10	Substatecharts from Stage_1	144
5.11	GrapeMilDeWS Stage_2	145
5.12	Substatecharts from Stage_2	146
5.13	GrapeMilDeWS Stage_3	147
5.14	GrapeMilDeWS Stage_4	148
5.15	GrapeMilDeWS Stage_5	149
5.16	Substatecharts from Stage_5	150
5.17	GrapeMilDeWS Stage_6	151
5.18	Partition of the families of products targeting downy mildew	152
6.1	GrapeMilDeWS main process view	163
6.2	<i>oeGrapeMilDeWS</i> ' communication flow	164
6.3	Fungicide classes and associated active periods (AP) as modeled in GrapeMilDeWS	168
6.4	2005 and 2006 crop protection seasons for each experimental Results	169
6.5	Number of treatments applied with <i>oeGrapeMilDeWS</i> compared to the treatments made in Bordeaux	172
6.6	Proportions of perfect fits, temporal discrepancies and complete mismatches between the Experimental and Simulated GrapeMilDeWS	174
6.7	Tuckey quartile box plot of time differences from $M_{(e-s)} = M_e(i, j) - M_s(i, j)$ for each action or each decision	175
6.8	Sequences of decisions and actions for each (half) plot and year	176
6.9	Temporal distributions of Experiments and Simulations, decisions/actions for all vintages.	177
6.10	Tuckey Box plot for the relative differences between pairs of D/A	178
6.11	Comparison of experts' phenological stage estimates in 2005 and 2006 Vs three multi-linear regression models	184
7.1	Principes du « model checking »	198

7.2	Résumé des travaux présentés dans cette thèse et des perspectives proposées	201
7.3	Modèle des comportements de l'opérateur humain en situation de conduite de procédé	203
7.4	Formalisation et vérification de protocoles dans le projet Protocure	204
A.1	Fréquences cumulées des réponses à la question : classez les maladies suivantes de la plus inquiétante à la moins inquiétante ?	232
A.2	Critères cités comme déterminants la décision de traitement	234
A.3	Distributions des critères de choix de produits selon les préférences des viticulteurs et selon le groupe d'appartenance.	238
A.4	Tableau de contingence du nombre annuel de traitements appliqués contre le mildiou et l'oïdium entre 2004 et 2006 par les viticulteurs de l'échantillon . . .	239
A.5	Boîte de Tuckey du nombre annuel moyen de traitement	239
A.6	Questionnaire	241
D.1	Le model Décisionnel de l'exploitant utilise 3 classes de raisonnement : à la parcelle, au groupe de parcelles, à l'exploitation.	259
D.2	M. B. gère les applications d'insecticides parcelle par parcelle. Principalement du fait de la Flavescence Dorée.	260
D.3	M. B. Décide ses traitements anti-pourriture grise en fonction du cépage. Il constitue 4 groupes pour adapter les applications.	260
D.4	Le mildiou, l'oïdium et l'excoriose sont gérés à l'exploitation.	261

Liste des tableaux

1.1	Synthèse de l'étude des pratiques phytosanitaires en bordelais.	14
1.2	La protection des cultures dans le contexte de l'agriculture durable	21
3.1	Articulation périodes de risques, étapes, objectifs de protection	93
4.1	Projection onto the GrapeMilDeWS state space of decisions taken in 2006 on plot Latresne Merlot	116
5.1	GrapeMilDeWS product selection rules	152
6.1	Thresholds used in the 2005 & 2006 experiments for each evaluation and disease.	165
6.2	Quality results at harvest	171
6.3	Number of treatments per plot-vintage	173
6.4	Distribution of optional treatments over all plots per vintage, treatment . . .	175
7.1	Classes de propriétés pouvant être vérifiés	199
A.1	L'échantillon retenu	229
A.2	Les appellations du vignobles Bordelais, leurs surfaces et le nombre d'explo- itations	229
A.3	Caractéristiques des exploitations	230
A.4	Etes-vous propriétaire ? (selon le groupe)	231
A.5	Tableau de contingence travaux en vert	231
A.6	Quel niveau de présence acceptez-vous ?	233
A.7	Stratégies d'observation des maladies et leurs utilisations	236
A.8	Quels bulletins d'information concernant la protection du vignoble recevez- vous ?	237
A.9	Quels sont les stades auxquels vous traitez la pourriture grise ?	237
A.10	Synthèse de l'étude « pratiques phytosanitaires en bordelais ».	240
B.1	Documentation de la Règle De Décision (RDD) Mildium pour l'expérimenta- tion 2005	246
E.1	2005 diseases levels and interpreted values at each evaluation date per plot .	264
E.2	2006 diseases levels and interpreted values at each evaluation date per plot .	264
E.3	Evolution of the variable ILM in 2005 and 2006 according to the global downy mildew epidemic risks as reported in the Aquitaine official warning service bulletins	264
E.4	Records of rain forecasts from treatment request form, values used as simula- tion input. (The forecast and the following rain were compared showing that the forecasts are issued on average, one day before the rains) ($avg = 1.1; \sigma = 0.83$)	264
E.5	The treatment requests for the year 2005 the target disease and plots	265
E.6	The treatment requests for the year 2006 the target disease and plots	265
E.7	Product used during the experiments, related to its GrapeMilDeWS product type* , the active period and the treatment proposals in which the product was selected This is the classification as implemented in GrapeMilDeWS , some product may eventually belong to more than one class of product	265

E.8 Summary of phenology as used in the Simulations. Only the triggering values
are shown 266

Liste des Encadrés

1	La Production Intégrée résumée	19
2	Structure d'un modèle de type Vanderplank corrigé pour le temps de latence et la période infectieuse	27
3	Le système de production agricole	44
4	Démarche de conception d'un POD.	90

