
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).

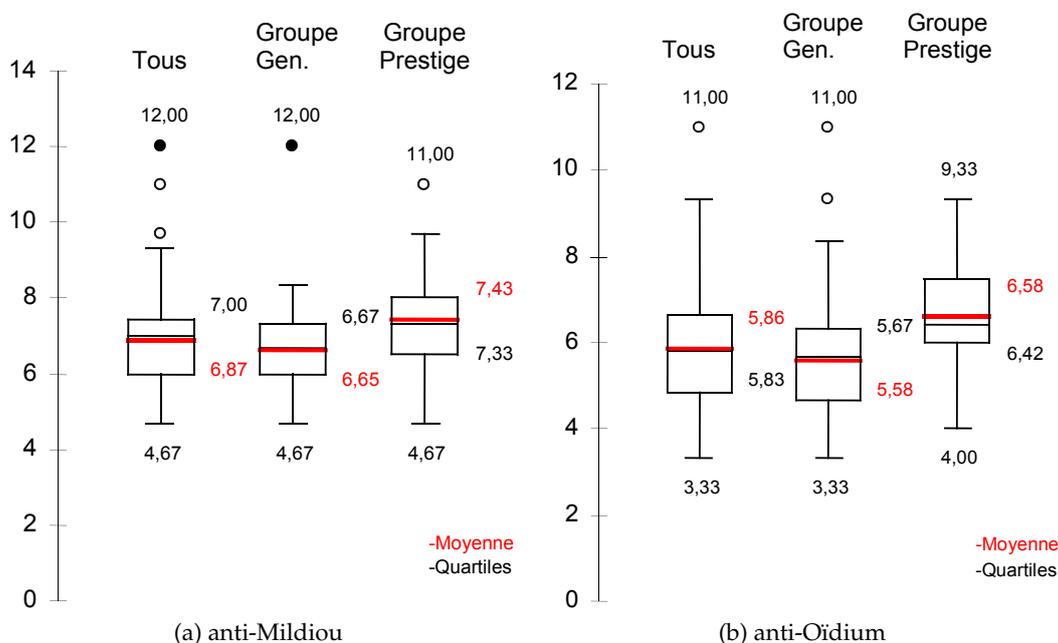


FIGURE 1.1 – Boîte de Tuckey du nombre annuel moyen de traitements (années 2004,2005,2006 sur un échantillon de 100 exploitations bordelaises). « Groupe Gen. » renvoie aux appellations vin Bordeaux générique et « Groupe Prestige » aux appellations haut de gamme, voir la caractérisation de chaque groupe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

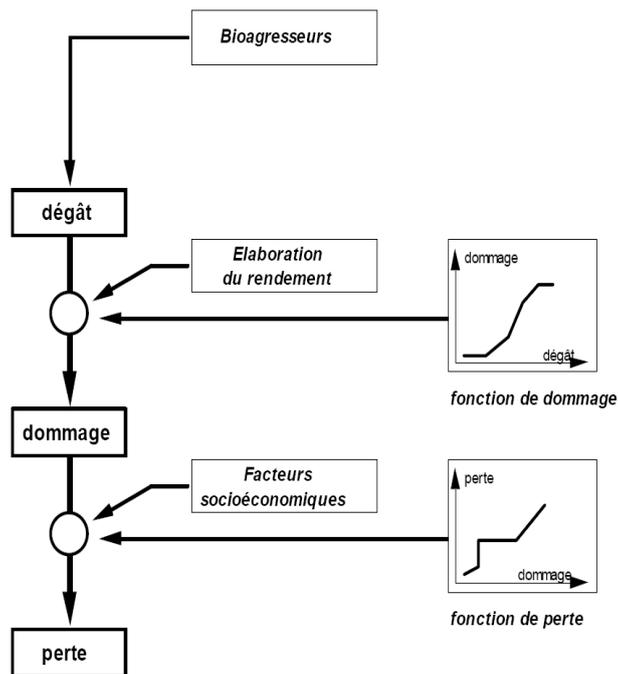
La définition 1 faisait allusion aux seuils de dégâts économiques comme la notion centrale de la PIC. En effet, l'approche moderne de la protection des cultures fait des distinctions fortes parmi les nuisances causées par un bio-agresseur. La figure 1.2 montre comment, d'une espèce (le bio-agresseur) 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 capitaliste 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.

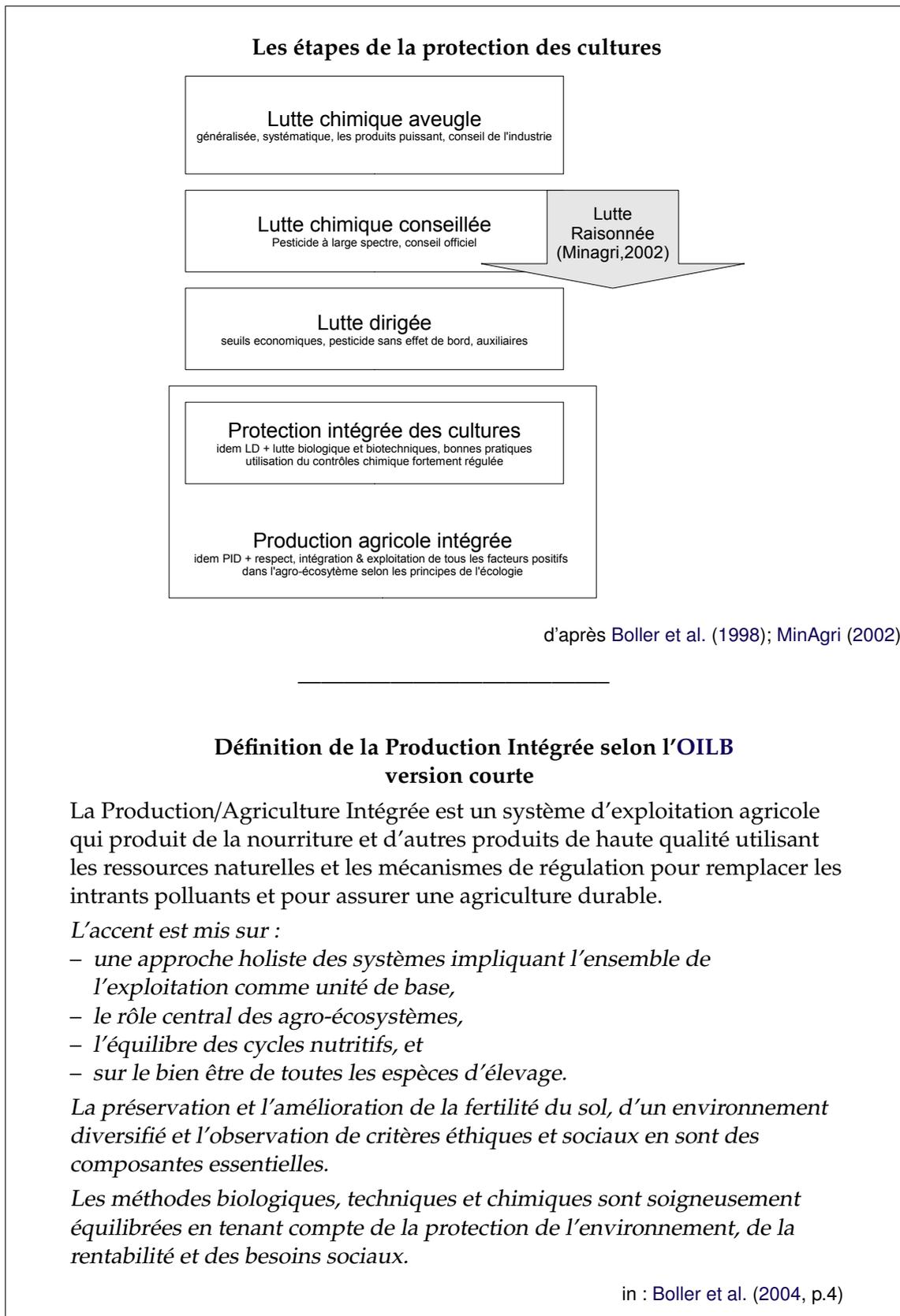
1.2.1.3 La protection intégrée des cultures est un processus dynamique

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



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 œuvre 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); Rappilly (1991); Trigiano (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.

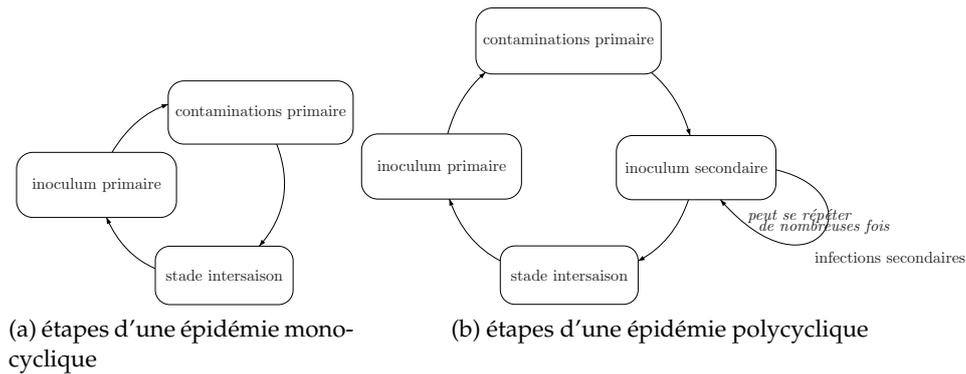
Une plante est malade lorsque ses fonctions physiologiques sont perturbées. Les plantes sont sensibles à de nombreuses maladies causées par différents bio-agresseurs (virus, phytoplasme, bactéries, champignons ou insectes ravageurs).

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.

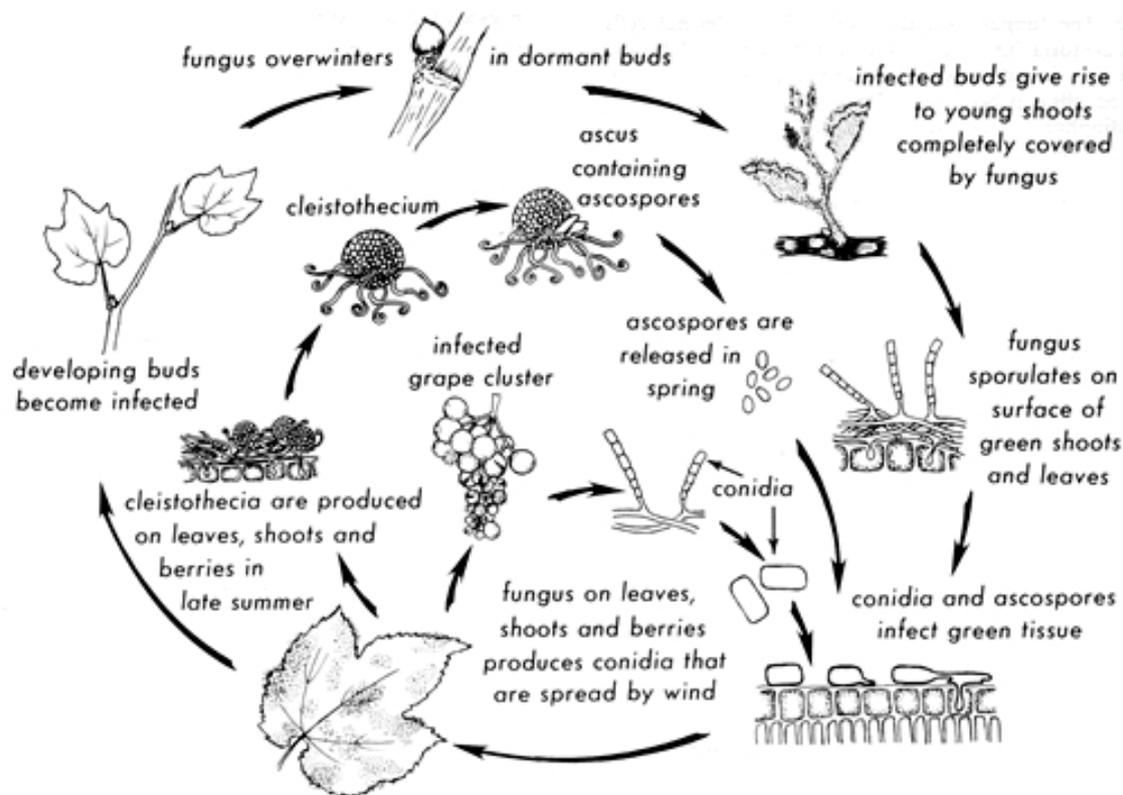
1.3.2 L'Oïdium de la vigne

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



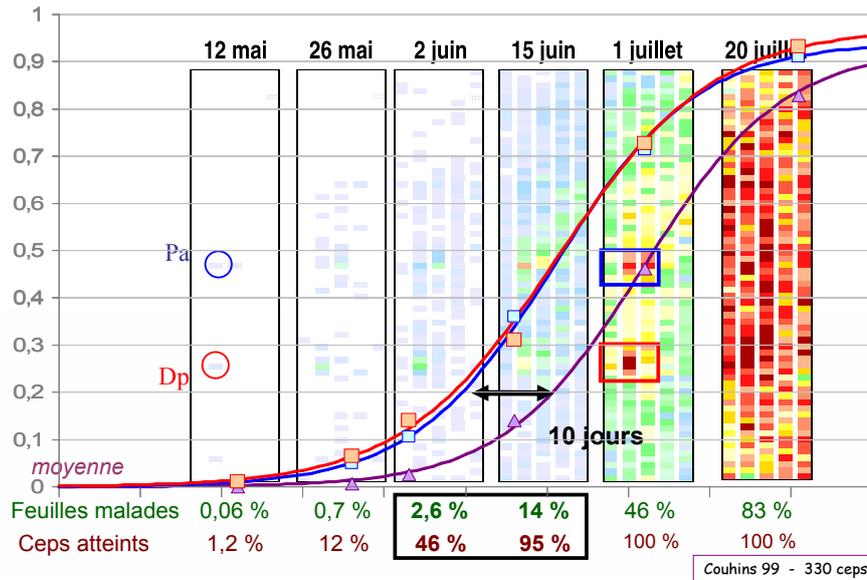
source : Pearson and Goheen (1988)

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 Epidémiologie

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) (Willoquet 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 :

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

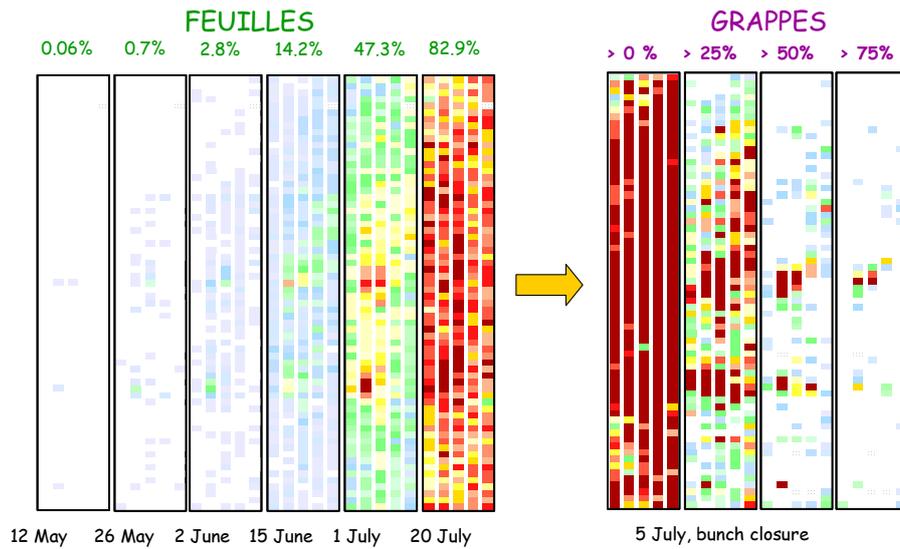
où $X(t)$ est la proportion de tissus infectieux à l'instant t et par conséquent $1-X(t)$ la proportion de tissus sains.

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.

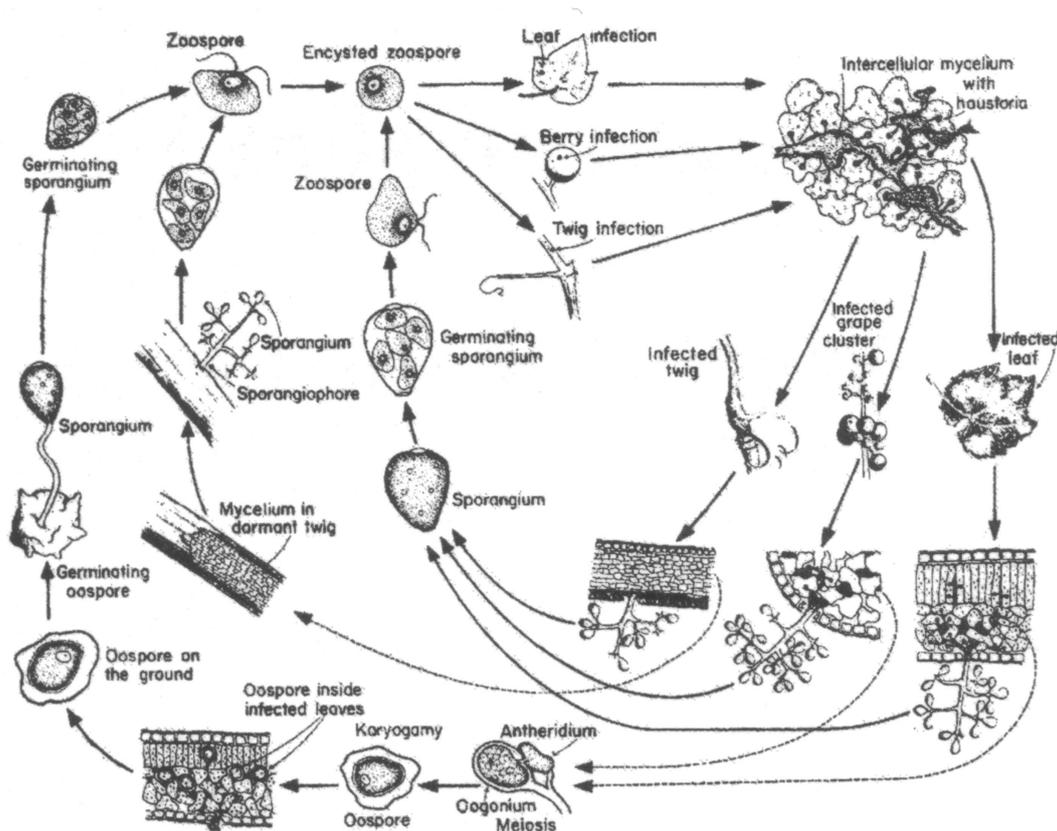
1.3.3 Le mildiou de la vigne

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*)

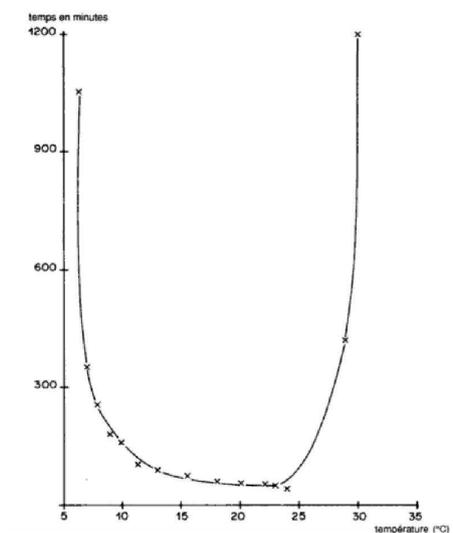
le phylloxera. Les études génétiques montrent qu'il y a eu plusieurs introductions en Europe (Gobbin et al., 2006).

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 enclencher 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).

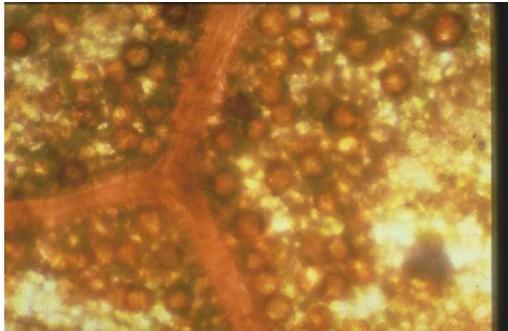
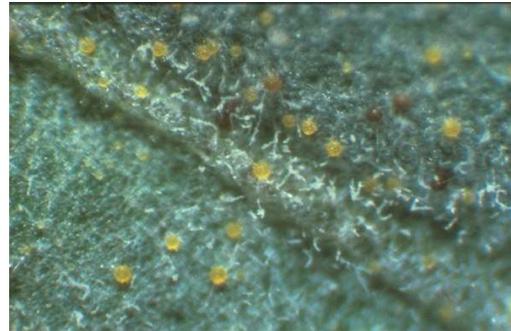
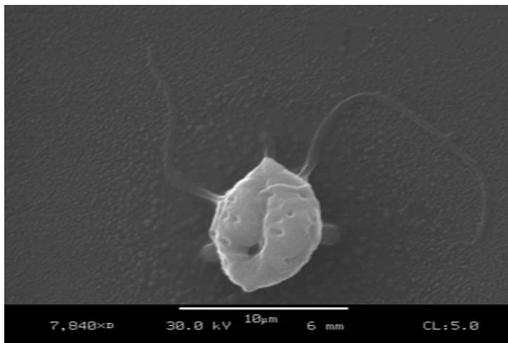
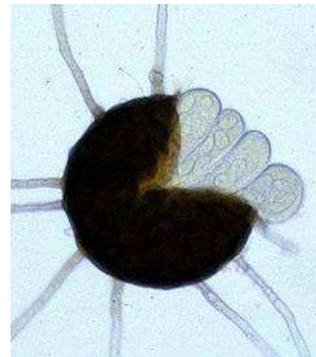
En ce qui concerne les dynamiques de population, de nombreux modèles ont été développés pour estimer la date de maturité des oospores : le modèle POM a déjà été évoqué et on peut rappeler les travaux du Services Régionaux de la Protection des Végétaux (SRPV) en la matière (Rouzet and Jacquin, 2003). 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 zoospore 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'oidium 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'oidium 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'oidium 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'oidium 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'oidium.

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 généralité. 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 Évènements 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.