



HAL
open science

Modélisation du cycle du mildiou de la vigne dans un outil d'aide à la décision : intégration de nouveaux formalismes

Jean-Charles Franche

► **To cite this version:**

Jean-Charles Franche. Modélisation du cycle du mildiou de la vigne dans un outil d'aide à la décision : intégration de nouveaux formalismes. Sciences de l'environnement. 2012. hal-01871194

HAL Id: hal-01871194

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01871194v1>

Submitted on 10 Sep 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

2010-2011

Nancy-Université
INPL

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt,
l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité
BIPE

Mémoire de Stage :
Modélisation du cycle du mildiou de la vigne dans un outil d'aide
à la décision : intégration de nouveaux formalismes.

Soutenu par :
Jean-Charles FRANCHE

à Nancy le 03/05/2012

Maître de stage :
Dr Vianney HOULÈS
Ingénieur en recherche et développement

SAS ITK
CEEI Cap Alpha
Avenue de l'Europe
34830 Clapiers



RESUME

L'utilisation des outils d'aide à la décision est en pleine expansion, et ce dans un contexte de changement climatique et d'évolution des pratiques agricoles vers un plus grand respect de l'environnement. L'entreprise ITK conçoit et développe ce type d'outil afin de permettre aux viticulteurs d'optimiser la protection de leur vignoble. L'un d'entre eux permet tout particulièrement de gérer la pression du mildiou, en s'appuyant sur un certain nombre de modèles agronomiques issus de la recherche scientifique. Il calcule un indice de risque de maladie en fonction des conditions environnementales et délivre ensuite aux viticulteurs des préconisations de traitement adaptées à leurs objectifs et à la législation en vigueur. Les connaissances scientifiques constituent le socle du modèle et permettent de mieux intégrer l'effet des paramètres climatiques sur le développement du champignon. Cependant, des parts d'ombre subsistent dans la description de certaines étapes du cycle biologique du champignon. Dès lors, le modèle se doit d'évoluer en suivant d'une part les avancées des connaissances scientifiques, et d'autre part le progrès technique améliorant la précision des mesures de données climatiques et épidémiologiques sur le terrain.

Ce stage avait pour but de construire un nouveau modèle mildiou dans le cadre d'une approche mécaniste en y intégrant les nouvelles connaissances scientifiques, et l'effet de nouvelles variables climatiques sur le cycle du mildiou alors que leurs données n'étaient pas disponibles à l'époque de la création du modèle précédent. Une attention particulière a été portée à la flexibilité de ce nouveau modèle pour qu'il puisse aisément subir des modifications au gré des avancées de la recherche.

Bien que ne disposant que d'une base de données de validation peu riche, les sorties du modèle ont été comparées aux données de terrain afin d'estimer la fiabilité des prédictions des dates de contaminations et d'intensité de maladie fournies par le nouveau modèle.

ABSTRACT

The use of decision support tools is growing, in a period of climate change and evolution in the agricultural world towards more environmentally friendly practices. The company ITK creates and develops this kind of tool to enable wine growers to optimize the protection of the vineyards. One of them allows to handle the pressure of the downy mildew, and is based on several agronomical models from the scientific research. It computes a disease risk index based on environmental conditions and issues treatment recommendations to wine growers tailored to their objectives, and to the actual legislation. Scientific knowledge constitutes the base of the model and allows to integrate the effect of the climatic parameters on the fungus development. However, gaps still exist in the description of several stages of the downy mildew biological cycle. Therefore, the model has to evolve with new research findings and technological progress improving climatic and epidemiological field data collection.

The aim of this work placement was to built a new downy mildew model with a mechanistic approach, using the new scientific knowledge, and the effect of new climatic parameters on the whole fungus life cycle, whose data were not available for the previous model. Emphasis was placed on the model flexibility so that it can readily undergo changes if new knowledge concerning the pathogen would appear. In a context of poor field data base, predictions were confronted to field data to estimate the reliability of the predictions of contaminations and disease severity.

SOMMAIRE

Introduction	
I – Etat des lieux des connaissances	p5
1 – Modélisation des épidémies, de la théorie à la pratique	p5
1 – 1 Approches et outils mathématiques au service des épidémiologistes	p5
1 – 2 Les OAD	p5
2 – Biologie et modélisation de <i>Plasmopara viticola</i>	p5
2 – 1 Présentation du champignon et de la maladie	p5
2 – 1 – 1 Classification	p5
2 – 1 – 2 Cycle et symptômes du mildiou de la vigne	p6
2 – 2 Les différentes étapes du cycle de <i>Plasmopara viticola</i>	p7
2 – 2 – 1 Reproduction sexuée et contaminations primaires	p7
2 – 2 – 2 Reproduction asexuée et contaminations secondaires	p9
3 – Effet du changement climatique sur les cycles de la vigne et de <i>P.viticola</i>	p10
3 – 1 Sur la vigne	p10
3 – 2 Sur <i>Plasmopara viticola</i>	p10
4 – Conclusion partielle	p10
II – Matériel & Méthodes	p10
1 – Contraintes et données à disposition	p10
1 – 1 Données météorologiques	p10
1 – 1 – 1 Données disponibles	p10
1 – 1 – 2 Données calculées	p11
1 – 2 Données de validation	p12
1 – 3 Couplage du modèle mildiou avec d'autres modèles	p12
1 – 3 – 1 Couplage avec un modèle plante	p12
1 – 3 – 2 Couplage avec un modèle de produits chimiques	p13
2 – Méthodes	p13
2 – 1 Choix de l'approche de modélisation	p13
2 – 2 Choix de construction du modèle mildiou	p13
2 – 2 – 1 Modularité du modèle	p13
2 – 2 – 2 Choix des entrées et des sorties du modèle	p13
2 – 2 – 3 Gestion des flux	p14
III – Le modèle conceptuel et les premiers résultats	p14
1 – Conceptualisation du modèle	p14
1 – 1 Principe général de calcul	p14
1 – 2 L'architecture du code	p15
2 – Choix des formalismes	p15
2 – 1 Sous-modèle de contamination primaire	p16
2 – 2 Sous-modèle de contamination secondaire	p19
3 – Analyse de la cohérence des sorties observées et importance des paramètres choisis	p21
IV – Conclusions et Perspectives	p26

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Cycle biologique du mildiou de la vigne, études et modèles correspondants	p6
Figure 2 : Simulation de données horaires de température et optimisation par le modèle de Sall	p11
Figure 3 : Différentes approches de modélisation d'un cep de vigne	p12
Figure 4 : Principe général de communication entre modules au sein du modèle conceptuel	p15
Figure 5 : Schéma de l'architecture du code	p15
Figure 6 : Evolution du stock d'oospores vers la maturation et des variables utiles aux calculs en Aquitaine en 2002	p21
Figure 7 : Germination des oospores et dispersion puis interception par le couvert des zoospores en Aquitaine en 2002	p22
Figure 8 : Evolution des surfaces saines, latentes, sporulantes et nécrosées en Aquitaine en 2002	p22
Figure 9 : Comparaison entre contaminations simulées et observées en Aquitaine en 2004	p26
Tableau 1 : Variabilité des dates de cumul de jours de froid	p16
Tableau 2 : Influence de la date de débourrement sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2002	p23
Tableau 3 : Influence du stock initial d'oospores sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2002	p23
Tableau 4 : Influence du seuil de pluie des contaminations primaires sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2004	p24
Tableau 5 : Influence du seuil de pluie des contaminations secondaires sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2002	p24
Tableau 6 : Influence de la hauteur de souche sur l'intensité de la maladie en Aquitaine en 2002	p24
Tableau 7 : Influence du nombre d'étages foliaires touchés sur l'intensité de la maladie en Aquitaine en 2002	p25

INTRODUCTION

Les modes de productions intensifs, jusqu'ici très largement utilisés dans l'agriculture pour répondre à une demande grandissante, nécessitent l'utilisation de produits phytosanitaires en très grande quantité. Dans le même temps, des mesures sont prises particulièrement en Europe pour inciter le monde agricole à en limiter l'usage. Le but avoué est de l'en rendre moins dépendant afin de respecter les équilibres écologiques et de préserver l'environnement. Ainsi, plusieurs mesures ont été prises comme le plan Ecophyto 2018 issu du Grenelle de l'environnement, la directive cadre sur l'eau de 2000, ou encore l'éco-conditionnalité des aides de la future PAC 2013 au respect de normes minimales obligatoires (site Internet n°1).

Or, le monde viticole est l'un des secteurs agricoles les plus gourmands en produits phytosanitaires, et se trouve donc directement concerné par ces mesures. En effet, bien que ne représentant qu'environ 3% de la SAU en France (site Internet n°2), la viticulture concentre plus de 14% de la quantité de produits utilisés, et jusqu'à 30% pour les seuls fongicides, le tout réparti en une vingtaine de traitements par an (Aubertot *et al.* 2005). L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) moyen de la vigne est de 13 mais varie de 7 en Provence à 22 en Champagne (Butault *et al.*, 2010) mettant en avant de profondes différences dans les approches culturelles selon les régions. En outre, la part du budget des viticulteurs consacrée aux produits phytosanitaires est grandissante, atteignant 25% à 45% des charges des exploitations viticoles en 2006 (site Internet n°3).

De plus, le mildiou de la vigne est une des maladies les plus destructrices sur vigne dont l'impact se mesure à l'importance économique de la filière viticole en France et dans le monde. En effet, la France, 2^e producteur mondial en 2010 (18 % de la production), a exporté pour 6,33 milliards d'euros de vins cette année là (+ 14 % par rapport à 2009), et le chiffre d'affaires global de la filière s'élevait à 11 milliards d'euros en 2009 (site Internet n°4). Des pertes de rendements de l'ordre de 30 à 50% (site Internet n°5) sont observables, engendrant dès lors de considérables pertes économiques.

Ce constat général démontre la nécessité d'apporter des solutions aux viticulteurs afin de les aider à mieux cibler leurs traitements et optimiser leur application.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'entreprise ITK (Intelligence, Technology and Knowledge) qui conçoit notamment des outils d'aide à la décision utilisés dans différents secteurs de l'agronomie. ITK Protect, un de ces outils de conseil consacré à la protection du vignoble, intègre un modèle mildiou permettant de prévoir en temps réel les risques de contaminations en fonction du climat et des applications de produits phytosanitaires réalisés par le viticulteur. Aujourd'hui, cet outil datant de 2007, repose sur des connaissances issues de la bibliographie qui ont bien évoluées depuis et prend uniquement en compte les effets des paramètres climatiques dont les données étaient alors disponibles. Aujourd'hui, de nouvelles données sur la durée d'humectation des feuilles, la vitesse du vent et l'humidité relative de l'air sont disponibles et pourraient permettre d'améliorer la précision du modèle grâce en outre à un pas de temps plus faible.

Les objectifs de la refonte de ce modèle sont multiples. Il a tout d'abord fallu mettre à jour des connaissances sur le développement de *Plasmopara viticola* et particulièrement sur l'influence du climat sur son cycle. Un autre objectif était d'améliorer les sorties et de rajouter aux dates de contaminations et d'apparition des tâches d'huile l'intensité de la maladie pour confronter plus facilement les résultats à des données de terrain.

I – Etat des lieux des connaissances

1 – Modélisation des épidémies, de la théorie à la pratique

1 – 1 Approches et outils mathématiques au service des épidémiologistes

De manière générale, la modélisation est un moyen de simplifier la réalité et de décrire le développement d'un agent pathogène au cours de son cycle biologique (Van Maanen and Xu, 2003). Un modèle doit être fiable, robuste pour ne pas apporter de réponses susceptibles d'entraîner des erreurs de décisions de l'utilisateur, et précis (Bouma, 2007). Les approches sont multiples et ce choix dépend des connaissances disponibles, du problème étudié et des objectifs fixés au préalable.

L'évolution temporelle d'une épidémie est l'élément clé que les modélisateurs cherchent à préciser (Savary, 1995). Les premières approches datent de 1963 par Van der Plank qui a décrit deux types de modèles, à savoir un modèle monomoléculaire, où la maladie dite monocyclique n'est fonction que de l'inoculum primaire et de la surface saine susceptible d'être contaminée, et un modèle logistique où la maladie dite polycyclique dépend en plus d'un inoculum secondaire (Rossi *et al.*, 2009).

Cependant, ses hypothèses négligent une caractéristique importante d'une épidémie qu'est sa structure spatiale (Savary, 1995).

Les outils mathématiques sont au service des épidémiologistes pour créer des modèles dans le but de décrire les dynamiques de contaminations et de développement des agents pathogènes. Des outils comme des modèles de croissance, des équations différentielles, des méthodes statistiques, et bien d'autres sont utilisées dans ce but (Contreras-Medina *et al.*, 2009). Cette grande diversité se retrouve tout particulièrement dans l'éventail de modèles de croissance dont disposent les scientifiques. Outre les modèles de Van der Plank, on retrouve les modèles exponentiels et de Gompertz (Contreras-Medina *et al.*, 2009), de Weibull (Pennypacker *et al.*, 1980) très proche du modèle logistique, ou bien encore de Richards (Lalancette *et al.*, 1987).

1 – 2 Les OAD

Ces modèles peuvent ensuite être intégrés dans des outils d'aide à la décision. Ces outils se sont développés au cours des années 80 avec l'essor de l'informatique dans le but de simuler le développement de nombreuses maladies sur différentes cultures. En 2007, 30 à 70% des exploitants avaient un accès à un ordinateur et 50 à 90% un accès à internet en Europe de l'Ouest (Bouma, 2007). L'un des premiers modèles de prévision de maladie fut le modèle EPIPRE (Epidemic Prediction), qui visait à prévenir les attaques de *Puccinia striiformis* sur froment. Ces modèles, non utilisables par les agriculteurs eux-mêmes, permettaient de prévenir les agriculteurs d'un risque d'attaque de maladie fongique nécessitant donc l'application de produits phytosanitaires.

Ces outils ont pour but d'apporter des informations à l'utilisateur afin de faciliter sa prise de décision qu'elle porte sur une question de date, de technique, ou de stratégie culturale (Bouma, 2007). Leur utilisation doit se faire avant tout en appui du savoir faire de l'utilisateur pour lui permettre de prévoir les situations à haut risque, de comparer différentes options, différents scénarios. D'autres champs d'utilisation sont possibles : comme moyen de communication, comme outils pédagogiques, d'apprentissage ou de réflexion (Rouzet, 2006).

2 – Biologie et modélisation de *Plasmopara viticola*

2 – 1 Présentation du champignon et de la maladie

2 – 1 – 1 Classification

L'agent responsable du mildiou de la vigne est le champignon *Plasmopara viticola* (Berk. & M.A. Curtis) Berl. & de Toni, (1888) de la famille des Oomycètes. Jusqu'en 1995,

les oomycètes étaient considérés comme faisant partie du règne des champignons mais des études sur la structure des flagelles des zoospores ont souligné leur appartenance phylogénétique au règne des Chromistes (Gamm, 2011), faisant d'eux des organismes plus proches des algues brunes et des diatomées.

Il s'agit d'un endoparasite obligatoire hétérothallique (Wong *et al.*, 2001), inféodé au genre des Vitacées, originaire d'Amérique du Nord et importé en Europe à la fin du XIXe siècle. Cet agent pathogène s'attaque à tous les organes herbacés de la vigne et tout particulièrement à ceux qui sont en pleine croissance car à forte teneur en eau (site Internet n°5), sans atteindre les parties racinaires (Galet, 1977). Ce champignon ne peut contaminer les feuilles qu'en pénétrant par les stomates ou par des ouvertures accidentelles (Gessler *et al.*, 2011).

Tous les cépages européens sont sensibles à *Plasmopara viticola* mais à différents degrés. Ainsi, les cépages Cabernet-Sauvignon, Pinots Noir et Blanc et Riesling sont considérés comme peu sensibles au contraire de cépages tels que Tempranillo, Albariño (cépages espagnols) et Touriga Nacional (cépage portugais) (Boso et Kassemeyer, 2008).

2 – 1 – 2 Cycle et symptômes du mildiou de la vigne

Le mildiou de la vigne est une maladie polycyclique comprenant des phases de contaminations primaires et secondaires qui vont assurer l'expansion du champignon (Gessler *et al.*, 2011) (Figure 1).

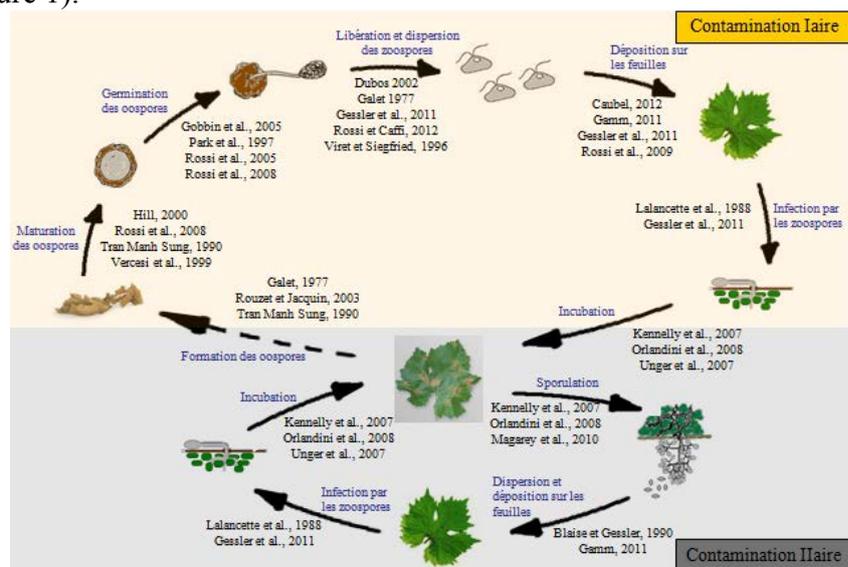


Figure 1 : Cycle biologique du mildiou de la vigne, études et modèles correspondants

Les périodes de contamination potentielle sont assez larges et sont pilotées par les stades phénologiques de la vigne. Ainsi, les symptômes sur feuille n'apparaissent qu'au stade Grappes visibles et jusqu'au stade Maturité (site Internet n°6)

Les symptômes de la maladie sont variés. Tout d'abord, les premiers signes sont visibles sur feuille et se présentent sous la forme d'une tache d'huile de 2 à 3 cm de diamètre (Galet, 1977) à l'opposée de laquelle se forme un feutrage gris lorsque les conditions climatiques sont favorables. A l'approche de l'automne, un autre faciès intervient : les feuilles sont touchées par le mildiou mosaïque qui se manifeste par de petites taches polyédriques de couleur jaune à brun-rouge nombreuses et limitées par les nervures (site Internet n°5).

Par ailleurs, des attaques sur grappe peuvent aussi intervenir engendrant des symptômes de type rot-gris (formation d'un duvet grisâtre sur les baies) si les attaques sont ante nouaison ou de rot brun (grains malades ridés et pourris) si elles interviennent en post

nouaison (Galet, 1977, Gessler *et al.*, 2011). En revanche, après la véraison, les baies ne sont plus réceptives (site Internet n°5).

Les rameaux, les vrilles, les boutons floraux et les inflorescences peuvent aussi être touchés (Galet, 1977) et conduire à des dessèchements.

Les attaques sur grappes et inflorescences sont les plus préjudiciables du point de vue du rendement (Jermini *et al.*, 2010), et les attaques sur les limbes des feuilles impactent la photosynthèse, donc le développement du cep et la qualité du raisin produit. En plus de l'impact quantitatif sur la production viticole, le mildiou de la vigne a des impacts avérés sur les caractéristiques analytiques et organoleptiques du vin en modifiant l'arôme du vin (Davidou, 2008 ; Dubos, 2002).

Finalement, la nuisibilité du mildiou s'établit à 3 niveaux que sont la qualité et la quantité de la production de l'année présente, et l'affaiblissement de la plante l'année suivante (Dubos, 2002).

2 – 2 Les différentes étapes du cycle de *Plasmopara viticola*

Cette partie reprend en les détaillant les différentes étapes du cycle présentées dans la figure 1 et qui seront modélisées par la suite.

2 – 2 – 1 Reproduction sexuée et contaminations primaires

2 – 2 – 1 – 1 De la formation à la maturation des oospores

Les oospores constituent la forme de conservation du champignon pendant la période hivernale (Gessler *et al.*, 2011), et la source d'inoculum primaire à la belle saison (Galet, 1977). Il s'agit de sa forme de conservation la plus souvent constatée sous les climats tempérés (Galet, 1977), mais on peut aussi le trouver sous forme de mycélium dans les bourgeons (Dubos, 2002) ou bien de conidies sur les feuilles restées sur le cep dans le cas d'hivers plutôt doux (Galet, 1977). Par ailleurs, un phénomène de dormance lié à une accumulation de jours froids assure leur conservation au cours de l'hiver (Rouzet et Jacquin, 2003).

Les oospores de *Plasmopara viticola* (20-120 µm de diamètre) sont formées grâce à la reproduction sexuée (de type oogamie siphonogame), par fécondation d'une anthéridie et d'une oogone en suivant deux étapes distinctes de plasmogamie puis de caryogamie.

Cette étape du cycle du champignon se déroule à l'intérieur des tissus au cours de l'automne et aboutit après la chute des feuilles, à une accumulation de pool infectieux dans la litière (Galet, 1977). Leur conservation est fortement dépendante des conditions météorologiques et notamment de la température (Galet, 1977). En effet, elles sont résistantes au froid à des températures pouvant descendre jusqu'à -26°C pendant 5 jours.

Suivant l'intensité de la maladie l'année précédente, le stock d'oospores peut varier entre 30 000 et 50 000 oospores par m² de sol (Rossi *et al.*, 2009).

La maturation des oospores se déroule en deux temps : elles acquièrent tout d'abord une maturité morphologique correspondant à un amincissement de leur paroi, puis une maturité physiologique correspondant à la réorganisation du matériel nucléaire et des réserves lipidiques (Vercesi *et al.*, 1999).

2 – 2 – 1 – 2 De la germination des oospores à la dispersion des zoospores

La germination correspond à la formation d'un sporange contenant des zoospores biflagellées (Gessler *et al.*, 2011 ; Vercesi *et al.*, 1999), et peut durer de 24h à 18 jours selon les conditions de température et d'humidité (Gobbin *et al.*, 2005).

Cette étape, favorisée par la pluie et des températures supérieures à 11°C (Park *et al.*, 1997), s'étale de janvier à juin avec un pic vers mars-avril (Gessler *et al.*, 2011).

En plus d'être inhibée par des températures élevées (>30°C) (Blouin, 2007), la faculté germinative des oospores ne semble pas se conserver très longtemps, se perdant très souvent dès la deuxième saison malgré leur résistance aux conditions météorologiques (Galet, 1977). Cependant, dans le cas contraire, des oospores résistantes peuvent parfois être à l'origine de la réémergence de la maladie après une année sans contaminations (Galet, 1977).

Les sporanges formés, dont la durée de vie varie de 6 à 10 jours (Park *et al.*, 1997), sont très sensibles aux conditions de température, d'humidité relative de l'air (Rossi *et al.*, 2005), et ne supportent pas la dessiccation.

En présence d'eau libre sur les feuilles de la litière et dans des conditions de température favorables, une cinquantaine de zoospores biflagellées sont libérées par sporange (Viret et Siegfried, 2005) et bénéficient d'une autonomie de déplacement de 30 min environ (Galet, 1977).

Une fois libérées, dans l'eau libre indispensable à leur survie (Dubos, 2002 ; Gessler *et al.*, 2011), elles peuvent être dispersées sur les organes verts situés à proximité du sol par effet splash et à une hauteur dépendant de l'intensité de la pluie (Rossi *et al.*, 2012).

2 – 2 – 1 – 3 Du dépôt sur les feuilles à la contamination

Les zoospores interceptées par le feuillage sont attirées par chimiotactisme en direction des stomates, et s'enkystent à leur niveau à condition que le tissu foliaire soit sain (Kiefer *et al.*, 2002).

Par la suite, dans des conditions de température et de durée d'humectation des feuilles favorables (Lalancette *et al.*, 1988) et si la feuille n'est pas trop âgée (Gessler *et al.*, 2011), un filament mycélien va pouvoir germer et pénétrer à l'intérieur de la feuille par l'ostiole. En revanche, la cuticule constitue une véritable barrière contre les attaques de mildiou (Rieman *et al.*, 2002).

2 – 2 – 1 – 4 Modèles de prévision des contaminations primaires

De nombreux modèles sont disponibles pour ces phases du cycle, mais n'apportant parfois qu'une description qualitative de certaines d'entre elles. Certains ont une approche empirique :

Le modèle POM décrit l'étape de maturation des oospores (Tran Manh Sung, 1990). Il s'agit d'un modèle empirique de prévision de la date de maturation à partir des pluies journalières entre octobre et janvier. Des indices de maturation mensuels sont calculés, prenant en compte des effets négatifs ou positifs du cumul de pluie.

Le modèle EPI (Caffi *et al.*, 2007), est un modèle systémique basé sur des études statistiques qui quantifie un potentiel de risque sur une échelle arbitraire. Il intègre par exemple l'influence de la pluviométrie et de la température sur la maturation des œufs d'hiver.

Le modèle SIMPO (Hill, 2000) prend en compte l'effet de la température et du déficit de saturation en eau sur la maturation et la germination des oospores en calculant un index journalier qui représente le nombre de jours d'incubation nécessaire à la germination.

D'autres suivent une approche dite mécaniste :

En 1997, le modèle DMCAST (Park *et al.*, 1997) a été créé pour simuler l'ensemble du cycle biologique de *Plasmopara viticola*. Il y intègre les effets de la température moyenne journalière et de la pluviométrie. Plus récemment, Rossi et son équipe ont mis au point un modèle mécaniste prenant en compte l'influence de la température, de l'humidité relative, de la pluviométrie et de la durée d'humectation des feuilles sur le développement de l'agent du mildiou de la vigne (Rossi *et al.*, 2008).

Par ailleurs, d'autres formalismes sont disponibles pour décrire la maturation par exemple. Ainsi, Gehman utilise des sommes de degrés-jour en base 8°C pour déterminer la date de fin de la maturation des oospores (Viret et Siegfried, 2005).

2 – 2 – 2 La reproduction asexuée et contaminations secondaires

Le rôle des contaminations primaires est d'initier la maladie qui sera amplifiée par les cycles secondaires. Ainsi, même si peu de contaminations primaires aboutissent à des contaminations secondaires (Matasci *et al.*, 2010), le pool infectieux initial assure le maintien d'un potentiel d'infection tout au long de la saison, ce qui peut engendrer un ré-enclenchement de la maladie dès que les conditions redeviennent favorables.

2 – 2 – 2 – 1 De l'incubation à la sporulation des tâches d'huile

Le mycélium unicellulaire et non cloisonné de *Plasmopara viticola*, situé suite à l'infection dans la chambre sous-stomatique, se développe très rapidement et se ramifie pour coloniser les tissus foliaires sans jamais pénétrer dans les cellules pendant l'incubation (Galet, 1977 ; Unger *et al.*, 2007).

Le temps d'incubation, fonction de la température et de l'humidité relative de l'air (Orlandini *et al.*, 2008 ; Rosa *et al.*, 1995), et dont la durée varie de 4 à 19 jours (Kennelly *et al.*, 2007), est difficile à déterminer puisque la date de détection des tâches d'huile manque de précision et la vitesse de développement du mycélium varie suivant les cépages (Galet, 1977).

Une fois la tâche d'huile apparue, ses anneaux externes vont sporuler à la surface inférieure des feuilles uniquement la nuit (Rumbolz *et al.*, 2002) et dans des conditions d'humidité relative très élevée et de température entre 10°C et 30°C (Lalancette *et al.*, 1988). Par ailleurs, il a été montré que les tâches d'huile, dont la durée de vie n'excède pas 15 jours quelles que soient les conditions climatiques (Orlandini *et al.*, 2008), ont un potentiel de production de conidies déclinant en fonction du nombre d'évènements de sporulation (Kennelly *et al.*, 2007a).

C'est bien la reproduction asexuée qui assure l'expansion du champignon. Ainsi, chaque tâche d'huile peut être à l'origine de la formation de près de 200 000 conidies/cm² (Hill, 1989).

2 – 2 – 2 – 2 De la libération des conidies aux contaminations secondaires

La dispersion des conidies, comprenant à la fois les phénomènes de libération et de transport d'un endroit à un autre (De Wolf et Isard, 2007), est assurée par l'action mécanique de l'eau voire de la rosée et du vent (Matasci *et al.*, 2010). Cependant, l'action du vent et de la rosée sur la dispersion prête encore à débat, et les modèles issus de la littérature considèrent que la dispersion ne s'explique que par l'action de la pluie.

Les conidies ont une durée de vie influencée par la température de l'air et qui diminue avec l'augmentation du déficit de saturation de l'eau (Blaise et Gessler, 1990). C'est surtout le temps sec succédant à des pluies abondantes qui déciment le stock de conidies (Galet, 1977), ce que les viticulteurs du Midi résumant en disant que le mistral (vent sec et froid) « sulfate » pour eux.

2 – 2 – 2 – 3 Modèles de prévision des contaminations secondaires

Les contaminations secondaires sont aussi décrites par plusieurs modèles. Certains ont une approche empirique :

Le modèle EPI prend en compte l'influence de la température et de l'hygrométrie sur les contaminations secondaires.

D'autres suivent une démarche dite mécaniste :

Milvit, qui comporte une variante appelée Milstop adaptée au Midi méditerranéen, intègre l'influence de la pluviométrie, de la température et de l'humidité relative de l'air. D'autres modèles tels que Vinemild (Blaise et Gessler, 1990) et Plasmo (Rosa *et al.*, 1995) simulent le développement des infections secondaires au pas de temps horaire (température, pluie, humidité relative). Enfin, le modèle DMCAST comporte aussi une partie dédiée à la modélisation des contaminations secondaires simulant l'influence de ces mêmes paramètres climatiques sur la sporulation des tâches d'huile, la survie des conidies, et la contamination par les zoospores (Park *et al.*, 1997).

3 – Effets du changement climatique sur les cycles de la vigne et de *P.viticola*

3 – 1 Sur la vigne

De manière générale, la littérature fait état d'un avancement des stades phénologiques de la vigne lié à l'augmentation des températures à venir, et tout particulièrement de la floraison et de la véraison. Ainsi, la biomasse végétative devrait augmenter. Par ailleurs, les stress hydriques de fin de cycle devraient se généraliser. Malgré tout, l'intensité de ces effets varie selon les régions et le type de sol (Garcia de Cortázar, 2006).

3 – 2 Sur *Plasmopara viticola*

Malgré l'effet négatif de la baisse des précipitations qui conditionne l'humidité relative de l'air et la durée d'humectation des feuilles, Salinari et son équipe prévoient une augmentation de la pression maladie en Italie en lien avec les températures plus favorables des mois de mai et juin (Salinari *et al.*, 2006). Dès lors, cette étude prédit des contaminations plus précoces et par conséquent une augmentation du nombre de traitements phytosanitaires à effectuer.

Cependant, des travaux contradictoires existent aussi. L'effet négatif de la baisse des précipitations ne serait pas négligeable et contribuerait donc à un ralentissement des épidémies (Caubel, 2012). En revanche, tous sont d'accord pour dire que l'avancée de la date de débourrement favoriserait le cycle épidémique de *Plasmopara viticola*. En effet, un support physique de colonisation serait présent plus tôt dans la saison. Ainsi, une partie de l'inoculum primaire pourrait contaminer les plantes à une période où elles auraient normalement été détruites à la moindre sécheresse faute de feuilles supports.

4 – Conclusion partielle

Que ce soit le contexte politico-économique ou celui du changement climatique, de nombreux éléments poussent aujourd'hui les acteurs de la filière à repenser leurs approches vis-à-vis du mildiou de la vigne. L'intégration des effets de l'humidité relative de l'air et de la durée d'humectation des feuilles sur le cycle de *Plasmopara viticola* dans un outil d'aide à la décision apparaît dès lors comme étant particulièrement intéressante dans le but d'obtenir des simulations d'une plus grande précision.

II Matériel & Méthodes

1 – Contraintes et données à disposition

1 - 1 Données météorologiques

1 – 1 – 1 Données disponibles

Lors de la création de l'ancien modèle mildiou en 2007, le cahier des charges imposait de n'utiliser que les données de températures moyennes de l'air et de pluviométrie au pas de temps journalier. A présent, les commanditaires de l'outil sont en mesure de fournir sur des mailles d'autres variables comme l'humidité relative de l'air, la vitesse et d'orientation du vent et potentiellement la durée d'humectation des feuilles au pas de temps

hexa-horaire. L'évolution du cahier des charges implique donc une mise à jour et un enrichissement du modèle.

Un pas de temps plus fin permet de simuler plus précisément des événements biologiques du cycle de *Plasmopara viticola* qui dépendent parfois de variables climatiques quasi instantanées. C'est le cas par exemple de la dispersion des zoospores pouvant intervenir à la moindre averse quelle que soit sa durée. Quant aux données maillées issues de modèles (10x10 km²) de simulation météo d'un fournisseur, elles remplacent les anciennes mesurées directement en station, ce qui permet d'avoir une couverture spatiale exhaustive. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que ces données sont moins fiables que des données mesurées en station et surtout peu représentatives des conditions locales.

1 – 1 – 2 Données calculées

Le nouveau modèle fonctionne au pas de temps journalier mais repose pour toutes les étapes du cycle de *Plasmopara viticola* sur des modèles issus de la littérature fonctionnant à un pas de temps soit journalier soit horaire. Les données hexa-horaires ne sont donc jamais utilisées telles quelles dans le modèle, rendant nécessaire la transformation des variables du pas de temps hexa-horaire au pas de temps horaire voire au pas de temps journalier suivant les éléments de bibliographie. Le choix de faire tourner le nouveau modèle au pas de temps journalier repose sur le fait que certaines étapes du cycle de *Plasmopara viticola* ne nécessitent pas une grande précision. Le pas de temps journalier est alors suffisant et permet de réduire le temps de calcul informatique. Cependant, le pas de temps horaire est parfois utilisé si cela est nécessaire.

Ainsi, l'humidité relative et la température de l'air ont été calculées grâce au modèle de Sall (Sall, 1979) au pas de temps horaire à partir des données hexa-horaires (Figure 2). Ce modèle simule normalement l'évolution journalière de la température de l'air à partir de des températures minimales, maximales et moyenne. Le choix a été fait de l'utiliser aussi pour simuler l'évolution journalière de l'humidité relative de l'air en considérant qu'elle évolue de manière inverse par rapport à la température de l'air. Pour en vérifier la précision, des simulations ont été menées sur des fichiers météo dont les données sont au pas de temps horaire. La confrontation entre données horaires initiales et simulées, a finalement laissé apparaître des écarts qu'il a fallu corriger en utilisant un algorithme d'optimisation.

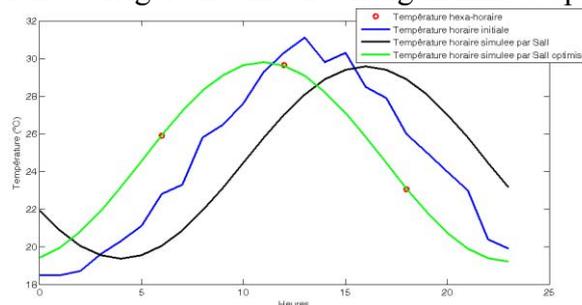


Figure 2 : Simulation de données horaires de température et optimisation par le modèle de Sall

Ainsi, les températures horaires simulées sont beaucoup plus proches des données horaires initiales.

Le même changement de pas de temps a été effectué pour la pluviométrie. Les cumuls de pluie hexa-horaires ont été répartis uniformément pour obtenir des valeurs horaires. La pluviométrie journalière a quant à elle été obtenue en sommant les cumuls hexa-horaires.

D'autre part, d'autres variables ont été créées à ces deux pas de temps pour répondre aux besoins des formalismes issus de la littérature qui sont utilisés dans le modèle : le déficit de pression de vapeur, une mesure du temps hydro-thermique, la durée d'humectation des

feuilles selon Rossi (Rossi *et al.*, 2008), la température moyenne pendant ces heures et enfin la durée de la nuit.

1 – 2 Données de validation

Utiliser un modèle dans un outil d'aide à la décision implique de le valider dans le cadre des utilisations liées à cet outil : valider un modèle pour tester ses capacités à prédire des intensités de maladie en fin de saison n'a pas le même but ni le même sens que de le valider pour prédire les dates de premières contamination par exemple. De plus, un processus de validation est long et délicat.

Comme le modèle développé ici n'est pas directement destiné à être intégré dans un outil et qu'en outre le temps imparti à ce stage était limité, nous nous sommes limités, dans le travail de validation, aux premières étapes : une validation qualitative d'abord, qui consiste à vérifier que le modèle réagit correctement par rapport à des variations de ces entrées. Ce type de validation ne nécessite pas particulièrement de données observées, une connaissance de la biologie du champignon et une expertise du comportement de la maladie au champ y suffit.

Néanmoins, une confrontation à des données observées peut être intéressante. Parmi le jeu de données de validation dont ITK dispose, se composant de bulletins des Avertissements Agricoles ou de la Santé du Végétal, de jeux d'essais produits fournis par le commanditaire qui donne essentiellement des dates d'observation de symptômes dans des conditions variées, nous avons choisi d'utiliser un sous-ensemble de données plus riche mais restreint en nombre de sites-années. Ces données ont fait l'objet d'un suivi des dates de sorties des différentes générations de taches, avec une mise en parallèle de la pluviométrie pour déterminer par expertise les dates de contaminations probables. Ce jeu de données est donc en théorie idéal pour évaluer la capacité du modèle à décrire les dates de contaminations et les durées de latence. En outre, des observations du niveau d'intensité de la maladie en fin de saison y sont indiquées. Dans cette base, six domaines ont été utilisés, un en Val-de-Loire, deux en Charente et trois en Aquitaine, pour les années 2002 à 2004.

1 – 3 Couplage du modèle mildiou avec d'autres modèles

Une épidémie peut être considérée comme le résultat de l'interaction entre une population d'hôtes et une population parasite. Il s'agit d'une interaction dynamique à chaque instant influencée par des facteurs divers comme les conditions climatiques, les pratiques culturales ou encore la compatibilité hôte-parasite (Savary, 1995). Des couplages avec des modèles de développement de la vigne et de dynamique des produits phytosanitaires peuvent donc être envisagés afin d'augmenter la précision des simulations.

1 – 3 – 1 Couplage avec un modèle plante

Il existe plusieurs façons de représenter le développement d'un cep de vigne avec des niveaux de précision variables (Figure 3).

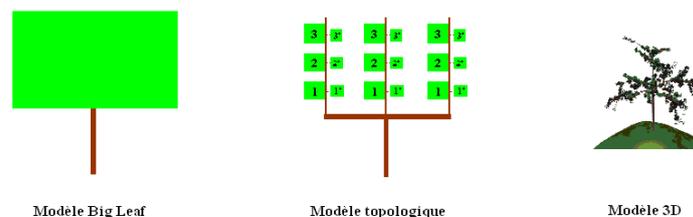


Figure 3 : Différentes approches de modélisation d'un cep de vigne

Il existe en première approche trois grands types de modèle plante (Tambour *et al.*, 2009) :

- Le modèle Big Leaf qui assimile la plante à une structure homogène et n'individualise pas les feuilles.
- Le modèle topologique qui détermine la position relative des feuilles les unes par rapport aux autres en disant « cette organe X porte l'organe Y » et individualise le comportement et les caractéristiques de chaque organe.
- Le modèle Architectural qui rajoute au modèle topologique des notions de position spatiale de chaque organe.

Le modèle Big Leaf ne fournit pas les informations nécessaires sur chaque étage foliaire comme on pourrait en avoir besoin. Le modèle architectural fournit quant à lui des informations sur les distances entre étages foliaires, mais la vigne étant une liane, il ne semble pas apporter une plus grande précision (Tambour *et al.*, 2009). Le modèle topologique constitue donc un bon compromis.

La maquette simule plus précisément la croissance d'un rameau de 30 phytomères primaires au niveau desquels peut s'insérer un seul phytomère secondaire au maximum mais ne gère cependant pas la sénescence naturelle des feuilles. En outre, l'absence de notion de position spatiale des feuilles dans cette maquette aura des conséquences sur la conceptualisation de la dispersion des spores.

1 – 3 – 2 Couplage avec un modèle de produits chimiques

Les pratiques culturales et notamment les applications de produits phytosanitaires peuvent aussi modifier le développement de *Plasmopara viticola*. Un modèle de dynamique de produits phytosanitaires pourra donc aussi être intégré au nouveau modèle mildiou en dehors du cadre de ce stage. Sa structure devrait faciliter cette intégration étant donné qu'elle découpe bien le cycle de *Plasmopara viticola* en un ensemble d'étapes clés, cibles de ces produits.

2 – Méthodes

2 – 1 Choix de l'approche de modélisation

Les objectifs du nouveau modèle nécessitent une approche plutôt mécaniste, mais il repose toutefois pour certaines étapes sur des relations empiriques issues de la bibliographie. Le caractère mécaniste du modèle permet de pousser la réflexion sur les processus impliqués dans le cycle biologique de *Plasmopara viticola* et expliciter l'effet des variables environnementales sur son développement.

Par ailleurs, le découpage de ce cycle facilitera d'autant plus le couplage avec le modèle de produits phytosanitaires dont les cibles bien connues ne peuvent être déterminées que dans le cadre d'une approche mécaniste.

2 – 2 Choix de construction du modèle mildiou

2 – 2 – 1 Modularité du modèle

La plupart des maladies des plantes commencent par une phase d'initiation, suivie de phases d'expansion. Les passages d'un stade à un autre sont contrôlés par des flux dépendant de facteurs climatiques, du stade phénologique de la plante hôte ou bien encore du parasite lui-même. Lorsque ces facteurs sont défavorables, des individus présents à un stade ne passent pas au stade suivant et peuvent dans certains cas être éliminés définitivement du cycle (Tambour *et al.*, 2009).

Compte tenu de la démarche de modélisation choisie, en lien avec les objectifs initiaux, ce type de modèle a été retenu et le logiciel Matlab a été utilisé pour la programmation informatique du modèle.

Une telle conception du modèle assure une certaine généricité des modules et les individualise. Il est alors possible de mener des étapes de calibration des paramètres des différents modules, d'intégrer de nouveaux formalismes directement à l'endroit voulu ou bien encore d'intégrer des connaissances expertes dans un module donné, sans avoir à modifier l'ensemble de la structure du modèle. Le modèle peut donc suivre les avancées de la recherche, ou être adapté en fonction des attentes de la part des utilisateurs ou d'ITK vis-à-vis des performances du modèle.

2 – 2 – 2 Choix des entrées et des sorties du modèle

Le choix a été fait de minimiser le nombre d'entrées utilisateur du modèle et de privilégier des données que l'utilisateur peut facilement obtenir voire mesurer lui-même directement à la parcelle. En effet, il est impératif de rendre l'outil le plus simple possible d'utilisation afin de faciliter sa prise en main par l'utilisateur. Seules deux variables d'entrées lui sont demandées : la sévérité moyenne de la maladie à la parcelle au 31 août et la hauteur moyenne de souche.

Le modèle propose des sorties concernant les dates de contaminations potentielles, les durées de latence et l'intensité de la maladie. La flexibilité du modèle laisse cependant la possibilité d'obtenir d'autres sorties comme les suivis des stocks d'inoculum ou encore les durées des cycles infectieux dans leur globalité.

2 – 2 – 3 Gestion des flux

Les effets des variables climatiques sur la totalité de ces flux, hormis la reproduction sexuée en hiver, ont fait l'objet de recherches et sont précisés dans la littérature. Des formalismes mathématiques, utilisés dans des modèles de prévision préexistants, sont parfois disponibles. Dans le cas contraire, on a accès à des descriptions qualitatives des impacts du climat sur le développement de *Plasmopara viticola*. Ce sont ces flux qui assurent les liens au sein de la chaîne d'infection dont chaque étape est sous la dépendance de l'accomplissement de la précédente (Savary, 1995).

La transmission des individus d'un stade à un autre peut être définie de deux façons différentes :

- soit instantanée en suivant un effet seuil
- soit progressive en suivant une loi dynamique

En effet, la littérature fait souvent état de seuils de conditions climatiques à atteindre pour considérer que l'ensemble des individus franchissent le stade auquel ils se trouvent. Le flux repose donc ici sur une loi du « tout ou rien ». Ce type de formalisme est utilisé par exemple par Rossi pour déterminer le temps de survie des sporanges (Rossi *et al.*, 2008).

L'autre approche, également utilisée par Rossi *et al.* (2008) dans le cadre de la maturation des oospores, permet de tenir davantage compte de la variabilité au sein de la population. En effet, tous les individus ne vont pas avoir besoin d'autant de temps pour passer au stade suivant.

L'effet seuil est certes simple à mettre en œuvre mais présente une contrainte majeure qui est que la loi du « tout ou rien » ne peut pas s'appliquer dans un système biologique. Pour y remédier, des fonctions logistiques et de Gompertz ont été introduites dans le calcul de ces flux. La fonction de Gompertz utilisée par Rossi *et al.* (2008) pour simuler la maturation des oospores tout au long de la saison et la fonction logistique ont toutes les deux des propriétés particulières qui les rendent plus ou moins intéressantes selon le contexte. La première a l'avantage de débiter son élévation plus vite et d'atteindre le plateau plus progressivement que la fonction logistique (Annexe 1). En revanche, les paramètres de la logistique ont un sens du point de vue biologique qui la rend facilement utilisable.

De ce fait, la fonction logistique a été privilégiée à la fonction de Gompertz pour simuler la germination des oospores et la durée de vie des sporanges dans le nouveau modèle mildiou.

III Le modèle conceptuel, modèle mathématique et premiers résultats

1 – Conceptualisation du modèle et structure informatique

1 – 1 Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel est le reflet du cycle biologique de *Plasmopara viticola*. Il reprend l'ensemble des étapes clés de ce cycle sur lesquelles des variables climatiques vont avoir un impact. Il s'agit ensuite de caractériser ces impacts en faisant le point sur les connaissances issues de la littérature, les modèles disponibles et les relations mathématiques qui les composent. Le modèle conceptuel peut alors préciser le mode de passage des individus d'un stade à un autre.

Chaque stade du champignon est défini par un module dans le modèle conceptuel et les flux reliant des modules entre eux sont régis soit par un seuil agissant comme un interrupteur, soit par un flux dynamique représenté par une vanne (Annexe 2).

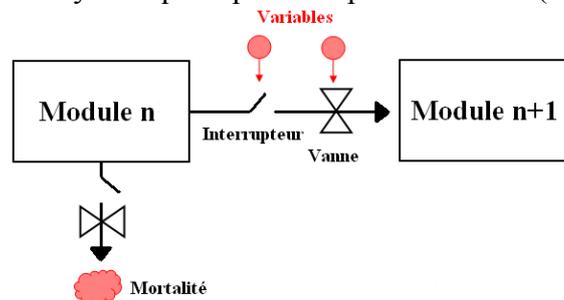


Figure 4 : Principe général de communication entre modules au sein du modèle conceptuel

Chaque module reçoit en entrée les sorties du module précédent, gère ensuite la mortalité des individus, puis calcule les taux de passages d'individus vers le module suivant (Figure 4). Les flux entre modules sont déterminés par des paramètres climatiques et par des variables décrivant l'état de la vigne (surface foliaire, âge des feuilles). Les pratiques culturales pourraient être prises en compte de la même façon mais étaient en dehors du cadre du stage.

1 – 2 Architecture du code

L'architecture du code est le reflet du modèle conceptuel. Les modules sont regroupés dans deux sous-modèles distincts de contaminations primaires (Conta I) et secondaires (Conta II) (Figure 5). Chaque module utilise 3 fonctions :

- « initialize » permet d'initialiser les variables d'états propres au module.
- « setParameters » fixe l'ensemble des paramètres utiles dans ce module.
- « compute » met à jour à chaque pas de temps la variable d'état qui décrit la population de ce module (nombre d'individus, âge). Elle a comme entrée cette variable d'état et les variables explicatives : climat, structure du couvert par exemples. Elle a comme sortie la variable d'état mise à jour et les informations nécessaires au module suivant.

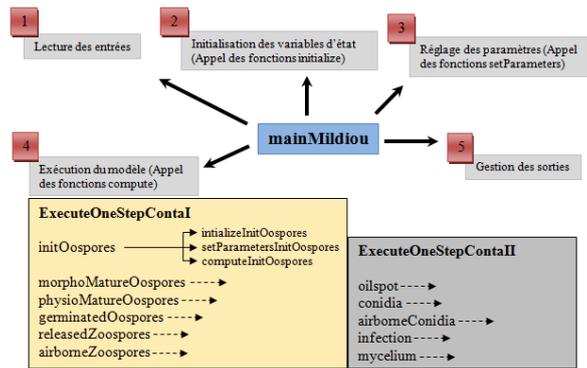


Figure 5 : Schéma de l'architecture du code

La séquence de calcul est la suivante : lecture des données météo, des informations sur le couvert, des entrées utilisateur ; puis appel des fonctions setParameters de tous les modules utilisant éventuellement les entrées utilisateur et des fonctions Initialize. Enfin, une boucle sur la durée de simulation appelle chaque fonction compute dans un ordre déterminé ce qui permet de mettre à jour les variables d'état à chaque pas de temps.

2 – Choix des formalismes mathématiques

Le modèle conceptuel délimite ce que doit faire le modèle et les formalismes explicites comment il le fait.

2 – 1 Sous-modèle de contamination primaire

Les effets des paramètres climatiques sur la reproduction sexuée n'étant pas définis dans la littérature, le modèle commence à partir d'un stock initial d'oospores calculé en fonction de la sévérité constatée au cours de la saison précédente et renseignée par l'utilisateur en entrée du modèle.

2 – 1 – 1 Maturation morphologique des oospores

La maturité morphologique correspond au déclenchement du processus de levée de dormance (cf paragraphe suivant). Cette étape de maturation morphologique est décrite qualitativement comme un amincissement des parois (Vercesi *et al.*, 1999). Rossi fixe ce déclenchement au 1^{er} janvier (Rossi *et al.*, 2008). Rouzet et Jacquin (2003) considèrent qu'il faut 60 jours de froid ($7^{\circ}\text{C} \leq T \text{ max} \leq 15^{\circ}\text{C}$) pour la déclencher. Ce formalisme présente le double intérêt d'introduire une variabilité qui est observée (Tableau 1) et d'être peu influencé par la date de début de la simulation. Il a donc été adopté dans le module initOospores.

Région / année	Aquitaine 2002	Aquitaine 2003	Aquitaine 2004
Date de cumul	21 janvier	24 janvier	31 décembre

Tableau 1 : Variabilité des dates de cumul de jours de froid

2 – 1 – 2 Maturation physiologique

Cette seconde étape de maturation des oospores correspond à la levée de dormance (aptitude à germer) et est influencée par la température, l'humidité relative de l'air et par la pluviométrie. Le module morphoMatureOospores reprend les formalismes de Rossi *et al.* (2008) basé sur la notion de temps hydro-thermique (HT) :

$$HT = \frac{M}{1330.1 - 116.19 * T + 2.6256 * T^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où T représente la température horaire et M représente l'humidité de la litière contenant les oospores calculée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Si } R > 0 \text{ mm ou VPD} \leq 4.5 \text{ hPa, } M &= 1 \\ \text{Si } R = 0 \text{ mm et VPD} > 4.5 \text{ hPa, } M &= 0 \end{aligned}$$

Où R représente la pluie horaire et VPD correspond au déficit de pression de vapeur (Caffi *et al.*, 2011) :

$$VPD = (1 - \frac{RH}{100}) * 6.11 * \exp(\frac{17.47 * T}{239 + T}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Où RH représente l'humidité relative horaire de l'air.

Les calculs sont réalisés au pas de temps horaire et ramenés au pas de temps journalier (cf II 1-1-2).

La capacité à germer est acquise de janvier à juin (Gessler *et al.*, 2011). Rossi *et al.* (2008) utilisent HT pour calculer un taux de levée de dormance selon le formalisme de Gompertz :

$$DOR = \exp(-15.891 * \exp(-0.653 * (HT + 1))) \quad (\text{Eq. 3})$$

C'est ainsi qu'il introduit une variabilité. Les paramètres utilisés par Rossi pourraient cependant être revus puisqu'une autre variabilité a été introduite avec les travaux de Rouzet et Jacquin (2003).

La proportion d'oospores qui atteint le stade de maturité physiologique (PMO) à chaque pas de temps de simulation est donc :

$$PMO = DOR * MMO \quad (\text{Eq. 4})$$

2 – 1 – 3 Germination des oospores

Le module physioMatureOospores utilise aussi les formalismes de Rossi (Rossi *et al.*, 2008). Il définit une période d'inoculum primaire pendant laquelle les oospores vont pouvoir être à l'origine de contaminations primaires (Rossi *et al.*, 2008), correspondant au moment où entre 3% et 97% des oospores ont atteint le stade PMO.

La germination est un processus déclenché par la pluie (Rossi *et al.*, 2008) aboutissant à la formation d'un sporange. Différents seuils étaient disponibles : seuil journalier de 2 mm de pluie (Park *et al.*, 1997) ou horaire de 0.2 mm (Rossi *et al.*, 2008). Le premier seuil a été retenu mais son effet restera à vérifier. Chaque événement pluvieux au dessus de ce seuil crée une cohorte d'oospores qui débutent leur germination. En cas d'absence de pluie, le stock d'oospores matures prêtes à germer augmente.

Une fois la germination d'une cohorte initiée, Rossi associe à chaque cohorte une variable GER (même calcul que HT), et considère que dès que la valeur 1 est atteinte, l'ensemble de la cohorte germe. Cependant, selon Gessler *et al.* (2011), toutes les oospores ne germent pas à la même vitesse et ce processus a une durée limitée.

De plus, le formalisme utilisé pour le calcul de GER repose sur l'hypothèse que la germination est possible à des températures inférieures à 10°C et supérieures à 35°C. Le but a donc été d'essayer d'introduire un autre formalisme permettant de mieux contrôler les températures de germination mais les durées de germination étaient supérieures aux descriptions faites dans la littérature (Gessler *et al.*, 2011).

Ce module enrichit donc les formalismes de Rossi en rajoutant une fonction logistique qui permet d'introduire une dynamique de germination au sein de chaque cohorte. Les paramètres de cette fonction ont été déterminés à l'aide de fichiers météo à disposition contenant des informations au pas de temps horaire. Le principe a été de fixer ces paramètres de telle sorte que des oospores commencent à germer au bout de 2h dans des conditions climatiques optimales (T=22°C, M=1) (Lalancette *et al.*, 1988), et pour que l'ensemble de la cohorte ait germé lorsque GER=1.

$$GermRate = \frac{1}{1 + \exp(-22 * (GER - 0.5))} \quad (\text{Eq. 5})$$

Par ailleurs, ce formalisme fait qu'un faible taux d'oospores peut germer après 18 jours ce qui contredit la durée maximale de germination rencontrée dans la littérature (Gobbin *et al.*, 2005). Ce taux de germination est donc nul une fois ce seuil dépassé.

2 – 1 – 4 Libération des zoospores

Le module `germinatedOospores` va calculer si les sporanges vont libérer leurs zoospores et leur mortalité. Il s'inspire aussi du modèle de Rossi.

Les zoospores contenues dans les sporanges, dont le nombre a été fixé à 50 (Viret et Siegfried, 1996), peuvent être libérées dans des conditions de durée d'humectation des feuilles de la litière et de température de l'air bien spécifiques. Les données de durée d'humectation n'étant pas disponibles, et bien que cela conduise à une surestimation, le choix a été fait de les approximer par la variable M (cf partie II 1-1-2).

Au cours d'une journée, les zoospores peuvent être libérées dans les conditions suivantes :

$$M\text{Day} \geq \exp\left(-1.022 + \frac{19.634}{T\text{MDay}}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Où MDay correspond au nombre d'heure avec M=1, et TMDay la température pendant ces heures.

Le flux de zoospores vers le module `releasedZoospores` calculé par Rossi fonctionne donc aussi comme un interrupteur.

Par ailleurs, les sporanges sont des structures très sensibles à la dessiccation (Rossi *et al.*, 2005). Rossi calcule une mesure du temps (SUS), fonction de la température et de l'humidité relative de l'air destinée à gérer la mortalité des sporanges. La valeur de SUS journalière est calculée pour chaque cohorte de sporanges de la manière suivante en sommant les valeurs horaires :

$$SUS = \frac{1}{24 * (5.67 - 0.47 * (T * (1 - \frac{RH}{100}))) + 0.01 * (T * (1 - \frac{RH}{100}))^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Dans son modèle, Rossi considère que la cohorte de sporange devient inerte dès que sa valeur de SUS atteint 1. Or, selon les auteurs, la durée de vie des sporanges varie de 6 h à 6 jours (Rossi *et al.*, 2005), voire jusqu'à 10 jours (Park *et al.*, 1997).

Une dynamique de mortalité au sein des cohortes de sporanges a donc été intégrée grâce à une fonction logistique. Ses paramètres ont cette fois été choisis de telle sorte qu'il y ait des sporanges commençant à mourir au bout de 6h pour des conditions de température et d'humidité défavorables (T=25°C, RH=10%), et que la quasi-totalité soit inerte dès que SUS=1.

$$SpoRate = \frac{1}{1 + \exp(10 * (SUS - 0.5))} \quad (\text{Eq. 8})$$

Le module élimine de plus les sporanges âgés d'au moins 10 jours.

2 – 1 – 5 Dispersion des zoospores

Des études ont montré que des pluies d'intensité de 0.2 mm/h suffisent à disperser des zoospores (Rossi et Caffi, 2012), indépendamment de leur durée (Madden, 1997). Le module `releasedZoospores` considère donc que les zoospores libérées dans le module précédent sont dispersées dès qu'il y a au moins une fois dans la journée une pluie horaire de 0.2 mm. Dans le cas contraire, elles sont éliminées car ce sont des structures dont la durée de vie n'excède pas la journée (Dubos, 2002), et qui sont détruites en absence d'eau libre (Rossi *et al.*, 2008).

2 – 1 – 6 Interception des zoospores primaires par le couvert végétal

Il a été montré que l'intensité de la pluie joue sur la quantité de gouttes projetées sur les feuilles et sur la hauteur de projection (Rossi et Caffi, 2012) mais sans que les informations fournies permettent de le modéliser de façon précise. De plus, la maquette plante utilisée ne décrit pas les hauteurs de chaque feuille. Pour pallier ce déficit d'informations, le module *airborneZoospores* calcule tout d'abord le taux de zoospores dispersées au dessus de la hauteur de la souche pour ensuite les répartir sur les trois premiers étages foliaires en place. Cet élément fait partie des paramètres dont l'effet sera à étudier.

La hauteur de la souche, demandée en entrée du modèle à l'utilisateur, influence aussi la quantité d'inoculum déposé sur les feuilles (Rossi et Caffi, 2012). Des préconisations de lutte prophylactique reposent d'ailleurs sur la taille des rejets pour éviter qu'ils ne servent de relais entre le sol et le cep (site Internet n°5).

Parmi la très large gamme de modèles disponibles dans la littérature, le modèle exponentiel est le plus couramment utilisé pour modéliser une dispersion d'inoculum par effet splash (Esker *et al.*, 2007) :

$$y = a * \exp(-b * d) \quad (\text{Eq. 9})$$

Où $y(d)$ est la quantité de zoospores dispersées à la hauteur d , a est le nombre d'individus à la source et b module la distance de dispersion

Cependant, il ne semble pas exister de tables de correspondances entre les valeurs de b et des intensités de pluie. Rossi et Caffi (2012) ont mesuré des hauteurs de dispersion en fonction des intensités de pluie. En se basant sur ces travaux, nous proposons de calculer y de la façon suivante (Annexe 3) :

$$y = a \text{ si } I > 3.72$$
$$y = a * \exp(-b * d) \quad (\text{Eq. 10})$$

Avec $b = -0.0357 * I + 0.1361$ où I est l'intensité de pluie

Une fois ces calculs réalisés, le module estime la proportion de ces zoospores interceptées par le feuillage. Pour cela, on considère que 100% du stock de zoospores sont susceptibles de transiter au niveau du 1^{er} étage foliaire, 50% du 2^e et 25% du 3^e.

Dans un second temps, on reprend le formalisme de la loi de Beer-Lambert afin de déterminer la proportion de zoospores qui sont réellement interceptées par chaque étage foliaire.

$$y = 1 - \exp(-0.68 * LAI) \quad (\text{Eq. 11})$$

Où LAI correspond au LAI d'un étage foliaire et k représente le coefficient d'interception fixé dans un premier temps à 0.68, valeur utilisée pour l'interception lumineuse de la vigne (Contreras-Medina *et al.*, 2009) et qui sera donc à ajuster.

Ce formalisme permet d'obtenir des ordres de grandeur d'interception de 3% cohérent avec les 5% décrits par Rossi *et al.* (2009).

2 – 2 Sous-modèle de contamination secondaire

Les étapes suivantes du cycle biologique de *Plasmopara viticola* sont l'incubation, la sporulation, puis la dispersion des zoospores assurant les cycles de contaminations secondaires. Cependant, le modèle nécessite de modifier l'ordre des modules pour être adapté à la réalité par rapport au cycle représenté en figure 1. L'ordre des paragraphes suivants concorde donc avec celui des modules du modèle.

2 – 2 – 1 La sporulation des tâches d'huile

Le sous-modèle de contamination secondaire débute par le module oilspot, basé sur les travaux de Lalancette (Lalancette *et al.*, 1987), qui évalue la quantité de conidies formées au cours de la sporulation des tâches d'huile.

La sporulation n'intervenant que la nuit (Rumbolz *et al.*, 2002), ce module détermine, au début du pas de temps de simulation, la quantité de conidies formées au cours de la nuit qui vient de s'écouler.

Les heures de lever et de coucher du soleil ont été déterminées à chaque pas de temps grâce à un modèle utilisé par ITK. Dès lors, le module évalue la nuit qui vient de s'écouler, compte le nombre d'heures nocturnes à humidité relative supérieure à 90% (nbHumidHour) et calcule la température moyenne pendant ces heures (tempHumidHour). Un minimum de 6 heures dans ces conditions d'humidité sont nécessaires pour la formation d'une cohorte de conidies dont le nombre est calculé de la manière suivante (Lalancette *et al.*, 1987) (Annexe 4) :

$$conidiaNb = k * (1 - \exp(B + \rho))^2$$

Où k, B et ρ dépendent de nbHumidHour et tempHumidHour.

En plus des variables climatiques, l'âge des lésions a aussi une influence sur le nombre de conidies formées :

D'une part, le potentiel de production de conidies d'une tâche d'huile diminue de manière exponentielle en fonction du nombre de fois qu'elle a sporulé. Pour prendre en compte cet élément, une fonction de sporulation relative, basée sur les travaux de Kennelly *et al.* (2007), calcule un taux de sporulation potentiel (RS) en fonction du nombre d'événement de sporulation d'une tâche d'huile donnée (NbSporulEvent):

$$RS = \frac{\exp(5.3 - 0.7 * NbSporulEvent)}{100} \quad (\text{Eq. 13})$$

D'autre part, des conditions de sécheresse (humidité relative de l'air faible et température élevée) semblent limiter leur durée de vie à une quinzaine de jours (Orlandini *et al.*, 2008). Le module ne fait donc plus sporuler les cohortes de lésions de plus de 15 jours.

Finalement, le module calcule en sortie le nombre de conidies formées par étage foliaire en multipliant le nombre de tâches d'huile par un potentiel de production pondéré par le taux RS.

2 – 2 – 2 La dispersion des conidies

Les conidies formées se détachent des conidiophores par l'action mécanique du vent et de la pluie. L'influence du vent sur la dissémination des conidies n'étant pas clairement précisée dans la littérature, le module conidia ne prend en compte que l'effet de la pluie. Ainsi, les conidies se détachent des conidiophores dès qu'il y a au moins une fois une pluie horaire de 0.2 mm.

De plus, le module intègre des éléments du modèle Vinemild (Blaise et Gessler, 1990) sur la durée de vie des conidies suivant les conditions de température et d'humidité relative de l'air (Annexe 5). Le module incrémente donc à chaque pas de temps un taux de survie propre à chaque cohorte de conidies de chaque étage foliaire. Le manque de données n'a ici pas permis d'introduire une fonction logistique, une fonction linéaire est donc utilisée pour que des conidies soient éliminées au fur et à mesure jusqu'à un taux de survie cumulé de 1 pour lequel plus aucune conidie ne subsiste. Aucune des 6 zoospores contenues dans chacune des conidies (Galet, 1977) ne pourra donc causer de contamination.

Le module conidia envoie au final dans le module suivant le nombre de zoospores pouvant causer des contaminations secondaires

2 – 2 – 3 Interception des zoospores secondaires

La déposition de ces zoospores va donc à nouveau dépendre de la surface des feuilles cibles mais aussi de leur position relative par rapport à la feuille émettrice. En revanche, tout comme pour les contaminations primaires, les échanges entre étages foliaires ne sont pas déterminés en fonction de leur distance relative et de l'intensité de la pluie. On considère donc que chaque étage foliaire va pouvoir se contaminer lui-même et toucher ses voisins d'ordre 2 selon les mêmes taux de 100, 50 et 25% utilisés dans le module airborneZoospores. Ces paramètres devront aussi être testés par la suite.

2 – 2 – 4 Contamination et incubation des tâches d'huile

Plasmopara viticola étant un parasite obligatoire, les zoospores ne peuvent s'enkyster et infecter une feuille que si elles se déposent sur du tissu sain.

Le module infection calcule tout d'abord la proportion de zoospores issues à la fois des contaminations primaires et secondaires qui sont déposées sur du tissu sain. Ensuite, il évalue l'efficacité d'infection des zoospores déposées sur chaque étage foliaire en fonction de la durée d'humectation des feuilles et de la température de l'air pendant ces heures (Lalancette *et al.*, 1988), et de l'âge des étages foliaires (Calonnec *et al.*, 2008). Calonnec *et al.* (2008) a établi une relation entre la sensibilité des feuilles et leur âge vis-à-vis de l'oïdium (Annexe 6). Cependant, comme pour l'oïdium, les feuilles sont sensibles au mildiou jusqu'à l'âge de 30 jours (Rossi *et al.*, 2009). Le choix a donc été fait de garder le même formalisme.

Tout comme dans les modules précédents, la variable M de Rossi est utilisée en tant que durée d'humectation pour calculer le taux d'infection effInf des zoospores en fonction du climat (Annexe 7).

$$effInf = \frac{k}{(1 + \exp(-\rho))^5} \quad (\text{Eq. 14})$$

Où k et ρ dépendent de MDay et de TMDay.

Ainsi, le module estime le nombre de zoospores qui contaminent effectivement chaque étage foliaire. A la fin du module, la surface saine disponible est mise à jour prenant donc en compte les contaminations primaires et secondaires qui sont intervenues au cours du pas de temps. Etant donné qu'aucune étude n'a décrit jusqu'ici la croissance des lésions de mildiou sur vigne (Caubel, 2012), le calcul de la surface malade repose sur une taille de lésion standard de 9 cm² (Rossi *et al.*, 2009) acquise dès la contamination (Caubel, 2012).

Cette hypothèse conduit donc a priori à une sous-estimation de la surface disponible pour les nouvelles contaminations.

Dernier module du sous-modèle de contaminations secondaires, le module mycélium reçoit en entrée le nombre de zoospores total ayant contaminé chaque étage foliaire, contaminations primaires et secondaires confondues.

En se basant sur le modèle Plasm (Orlandini *et al.*, 2008), ce module calcule l'avancée de l'incubation de chaque cohorte de tâches d'huile en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air. Ce taux d'incubation (incubRate) progresse à chaque pas de temps en suivant la relation suivante :

$$incubRate = \frac{2.616 * (T - T_{min}) * (T_{max} - T) * \sqrt{\frac{RH - RH_{min}}{RH_{max} - RH_{min}}}}{(T_{max} - T_{min})^2} \quad (\text{Eq. 15})$$

Toutes les tâches d'huile dont l'incubRate atteint 1 sont en état de sporuler dès que les conditions climatiques seront favorables au cours de la nuit suivante. Le nombre de tâche d'huile dont l'incubation est terminée est alors envoyé en entrée du module oilspot au pas de temps suivant.

3 – Analyse de la cohérence des sorties du modèle

3 – 1 Sorties du sous modèle contamination primaire

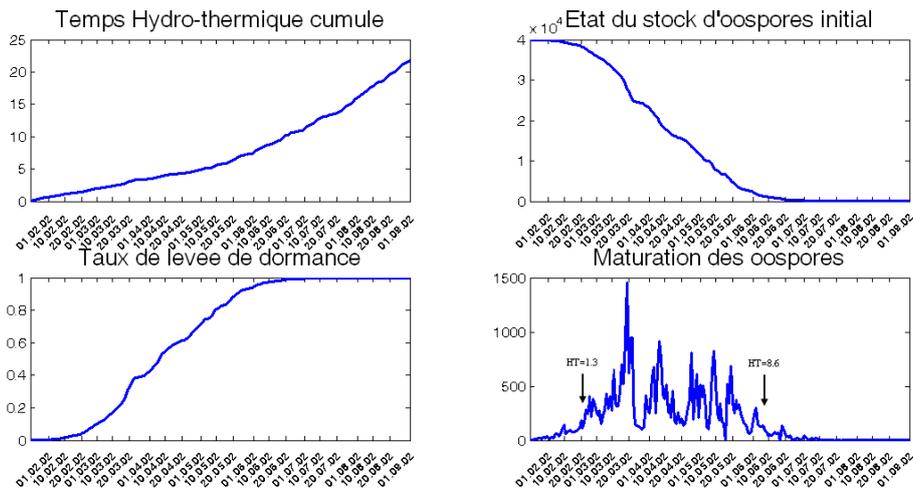


Figure 6 : Evolution du stock d'oospores vers la maturation et des variables utiles aux calculs en Aquitaine en 2002

La figure 6 représente l'évolution du stock d'oospores initial et sa maturation. Elle débute fin janvier dès que le cumul de froid nécessaire est atteint et se déroule bien de janvier à juin. La saison d'inoculum primaire au sens de Rossi *et al.* (2008) s'étend du 23 février au 8 juin dans ce cas. Le modèle ne prend donc pas en compte les oospores arrivées à maturité en dehors de cette fenêtre dans la suite des calculs.

La figure 7 représente un exemple d'étape suivante, la germination des oospores matures et la dispersion et l'interception des zoospores libérées :

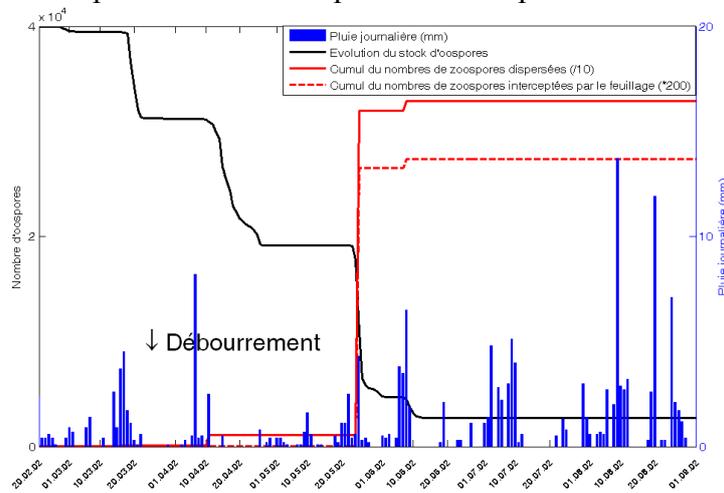


Figure 7 : Germination des oospores et dispersion puis interception par le couvert des zoospores en Aquitaine en 2002

Le débourrement intervient le 21 mars, date à laquelle environ un quart des oospores ont germé. Certaines d'entre elles ont germé à la faveur des pluies du 15 mars mais, en l'absence de feuillage, elles n'ont pas initié de contamination. Les premières contaminations ont lieu lors des grosses pluies de début avril : des zoospores sont dispersées (courbe rouge pleine) dont une assez faible proportion est interceptée par le feuillage. Les oospores continuent à germer mais les pluies du mois de mai ne permettent pas de projection à cause d'intensités de pluie trop faibles. Lors des pluies du 20 mai environ, les conditions pour des projections sont en revanche réunies, ce qui donne lieu à un deuxième événement de contamination primaire. Les feuilles sont plus développées à ce moment-là, ce qui fait qu'une plus grande proportion de zoospores est interceptée.

3 – 2 Sorties du sous modèle contamination secondaire

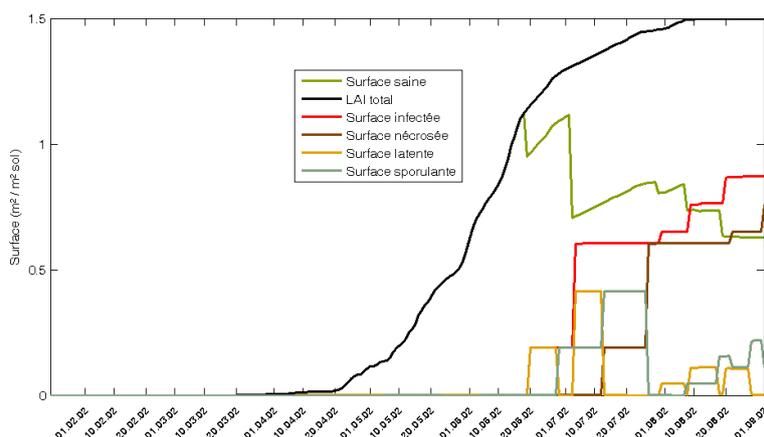


Figure 8 : Evolution des surfaces saines, latentes, sporulantes et nécrosées en Aquitaine en 2002

La figure 8 permet de tracer l'évolution du LAI total et des surfaces saines et infectées. Les surfaces infectées, sur lesquelles de nouvelles zoospores ne peuvent plus se développer, sont tout d'abord latentes, puis deviennent sporulantes dès que la période d'incubation des tâches d'huile est terminée. Ces surfaces ne peuvent sporuler que pendant 15 jours (cf I 2-2-2-1). Dès cette limite atteinte, les surfaces qui étaient jusque là sporulantes deviennent nécrosées et ne peuvent donc plus accueillir de nouvelles zoospores. L'intensité de la maladie en fin de saison est ici de 58%.

3 – 3 Influences de certains paramètres

L'ensemble des paramètres testés ci-après ont une influence similaire quelque soit le vignoble de référence, et l'année choisie. Les résultats ne sont donc présentés que pour une année et dans un seul vignoble de référence.

3 – 3 – 1 Influence de la date de débourrement

La date d'apparition des premières feuilles va influencer la précocité des contaminations pour des événements de dispersion identiques. De plus, l'âge des feuilles joue un rôle dans la contamination (cf III 2-2-4). Les dates de contaminations, leur nombre, et enfin l'intensité de la maladie en fin de saison sont donc être influencées par la date de débourrement.

Pour vérifier ce comportement, des simulations faisant varier les dates de débourrement à plus ou moins 15 jours de la date réelle ont été effectuées.

Date de débourrement	6 mars	21 mars	5 avril
Intensité de la maladie le 1 ^{er} septembre	63%	58%	65%
Date de 1 ^{ère} contamination	14 mars	7 avril	7 avril
Nombre de conta I	9	6	6
Nombre de conta II	19	18	18

Tableau 2 : Influence de la date de débourrement sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2002

La date de débourrement joue bien sur le nombre de contaminations et leur date. En revanche, l'effet sur l'intensité de la maladie est modéré (Tableau 2). Ce cas illustre la complexité des interactions entre le nombre d'événements contaminants et l'âge des feuilles lors de ces événements.

3 – 3 – 2 Influence du stock initial d'oospores

Nombre d'oospores	100	1000	10000	40000	80000
Intensité de maladie le 1 ^{er} septembre	33%	45%	56%	58%	58%

Tableau 3 : Influence du stock initial d'oospores sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2002

La date de 1^{ère} contamination, et le nombre de contaminations primaires et secondaires ne varient pas en fonction du stock initial d'oospores. Seule l'intensité de la maladie est influencée (Tableau 3), ce qui est conforme avec les résultats attendus. On constate de plus une saturation de l'intensité finale de la maladie par rapport au stock initial. Au-delà ce de seuil, le stock initial n'est plus limitant (parce que toute la surface disponible est contaminée). Mais les résultats pour les valeurs inférieures illustrent l'importance de ce paramètre difficile à déterminer.

3 – 3 – 3 Influence des hypothèses de dispersion des zoospores

Nous avons vu que les facteurs influençant le nombre de zoospores interceptées par le couvert lors de pluie ne sont pas les mieux renseignés dans la bibliographie, c'est pourquoi nous étudions les effets de ces paramètres sur la simulation.

Rôle de la pluie :

La pluie est l'élément moteur des contaminations primaires. Des très faibles seuils sont en général utilisés. Cependant, la précision des données météo maillées pourrait nécessiter de prendre des seuils plus élevés comme 2.5 mm/jour (Kennelly *et al.*, 2007). L'effet de ce seuil a donc été étudié :

Seuil de pluie	0.2mm/h	2.5mm/j
Intensité de la maladie	75%	75%
Date de 1 ^{ère} contamination	17 avril	18 avril
Nombre de conta I	20	14
Nombre de conta II	20	20

Tableau 4 : Influence du seuil de pluie des contaminations primaires sur les sorties du modèle en Aquitaine en 2004

Sur ces exemples, on constate que le seuil de pluie sur les contaminations primaires, même s'il a un effet sur le nombre d'événements efficaces, n'agit pas sur le niveau final de la maladie (Tableau 4). Dans le modèle, tout se passe comme si une contamination primaire suffisait, la gravité de la maladie étant ensuite dirigée par les contaminations secondaires.

Lors des contaminations secondaires, le seuil de dispersion des conidies semble aussi être important. La moindre pluie (0.2 mm/h) suffit pour certains (Orlandini *et al.*, 2008) quand 5 mm par jour sont nécessaires dans d'autres modèles (Blaise et Gessler, 1990).

	Aquitaine 2002		Charente 2002	
	0.2mm/h	5mm/j	0.2mm/h	5mm/j
Seuil de pluie	0.2mm/h	5mm/j	0.2mm/h	5mm/j
Intensité de la maladie	58%	0.1%	62%	44%
Date de 1 ^{ère} contamination	7 avril	7 avril	2 avril	2 avril
Nombre de conta I	6	6	12	12
Nombre de conta II	18	2	18	11

Tableau 5 : Influence du seuil de pluie des contaminations secondaires sur les sorties du modèle en Aquitaine et en Charente en 2002

Les seuils plus restrictifs pour la dispersion des zoospores issues des conidies réduisent le nombre de contaminations secondaires et l'intensité de la maladie (Tableau 5) : cet effet est très important et il conviendra donc de bien évaluer ce paramètre.

Influence de la hauteur de souche :

La hauteur de souche renseignée par l'utilisateur a une influence directe sur la proportion de zoospores qui peuvent être interceptées par le feuillage. Les vignobles de référence ont un cahier des charges imposant une hauteur minimale de feuillage de 40 cm par rapport au sol.

Cependant, cette hauteur peut varier très fortement allant de 30 cm pour l'AOC Chablis et jusqu'à 1 mètre pour l'AOC Alsace (Site Internet n°7 et 8).

Des tests ont été menés pour des simulations en Aquitaine pour l'année 2002 avec différentes hauteurs minimales de feuillage :

Hauteur minimale de feuillage	30 cm	40 cm	100 cm
Intensité de la maladie	58%	58%	36%

Tableau 6 : Influence de la hauteur de souche sur l'intensité de la maladie en Aquitaine en 2002

Un impact très net est noté sur l'intensité de la maladie au-delà d'une hauteur de cep de 40 cm, ce qui confirme que le modèle reproduit bien un effet de la hauteur des feuilles : il reste naturellement à vérifier que cet effet correspond à la réalité observée, ce que notre jeu de données ne nous permet pas de faire. En revanche, comme on pourrait s'y attendre, le nombre de contaminations et leurs dates ne varient pas en fonction de ce critère.

Influence du nombre d'étages foliaires touchés :

Nombre d'étages foliaires touchés	2	3	4	5
Intensité de la maladie	0.1%	58%	86%	87%

Tableau 7 : Influence du nombre d'étages foliaires touchés sur l'intensité de la maladie en Aquitaine en 2002

Le nombre d'étages foliaires touchés par les éclaboussures influence à nouveau l'intensité de la maladie mais ne modifie pas les dates et nombres de contaminations primaires et secondaires (Tableau 8). Dans ce cas, le 3^{ème} étage foliaire est essentiel pour l'initiation de la maladie, et ce très certainement du fait de l'âge des deux premiers étages foliaires au moment des premières contaminations. En revanche, L'intensité n'augmente pas beaucoup après le 4^{ème} étage.

3 – 4 Validation avec les données de référence

Pour vérifier les dates de contamination et de sorties de tâches ainsi que les intensités de maladie en fin de saison, nous disposons d'un jeu de données issus des vignobles de référence où ces informations ont été assez finement observées. On constate de façon assez générale que les données météorologiques utilisées, issues de données maillées, sont assez éloignées de celles qui sont reportées sur ces observations et mesurées sur une station météorologique proche : il en résulte un assez grand écart dans les simulations, y compris celles de la date du débourrement réalisé par le modèle plante. Ceci illustre l'importance de la qualité des données météorologiques et jette quelques doutes sur l'opportunité d'utiliser des données maillées pour ce genre de modèles. Il y a souvent plus d'événements pluvieux, ce qui a pour effet un excès de nombre de contaminations simulées et une intensité finale surestimée.

La figure 9 représente néanmoins une situation où les données météorologiques sont assez concordantes (Aquitaine 2004) : les dates de contaminations primaires sont en bleu et les dates de contaminations secondaires en rouge. Le symbole carré correspond à la date de contamination et le trait plein à la durée d'incubation des tâches d'huiles. Les contaminations

observées sont quant à elles représentées en marron. Bien que l'intensité de la maladie au 13 août soit sous-estimée par la simulation, les dates de contaminations semblent plutôt bien correspondre ainsi que les durées d'incubation. On constate encore une fois que les modules gérant les surfaces infectées sont à améliorer.

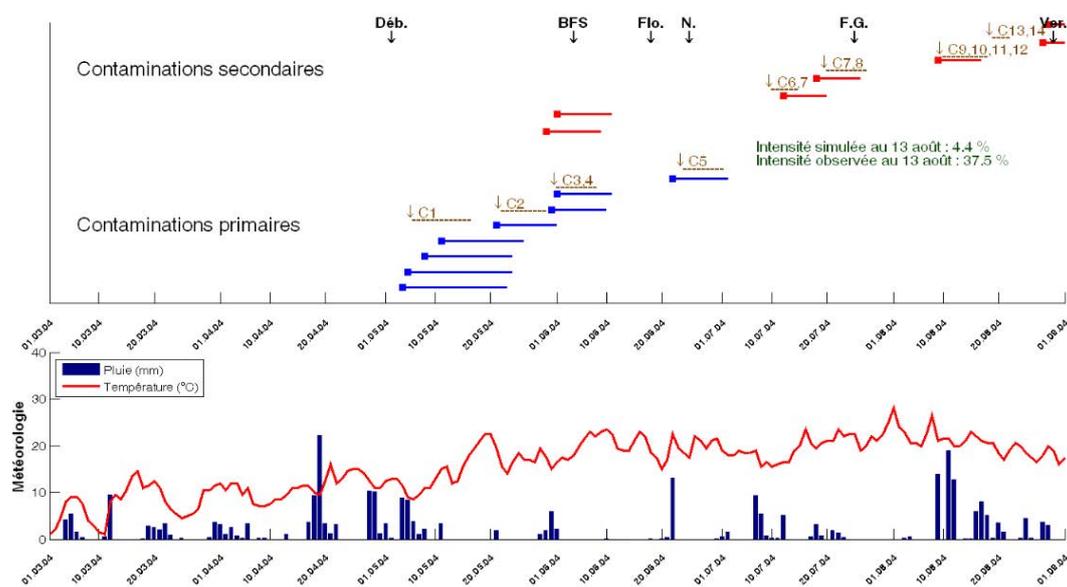


Figure 9 : Comparaison entre contaminations simulées et observées en Aquitaine en 2004

4 – Conclusions et perspectives

4 – 1 Résultats du stage

Bien que dans certains cas les résultats soient satisfaisants, les simulations lancées sur les domaines de référence laissent clairement entrevoir des problèmes sur l'estimation des dates de contaminations et de l'intensité de la maladie au 1^{er} septembre. Deux éléments peuvent expliquer ces écarts :

Les données de pluviométrie issues des données maillées diffèrent fortement comparées aux données locales des sites-années et ont tendance à être supérieures à la réalité. Or, la pluie est un facteur essentiel dans le développement de *Plasmopara viticola*. De ce fait, les simulations donnent trop de contaminations et donc une intensité de maladie trop importante. D'autre part, des écarts ont été notés entre les dates d'apparition des stades phénologiques simulées et observées, tout particulièrement pour la date de débourrement. Les simulations de développement du cep de vigne peuvent donc être à l'origine de contaminations nouvelles en cas de précocité des jeunes feuilles, ou avortées en cas d'âge trop important de ces mêmes feuilles.

Malgré tout, la plupart des objectifs initiaux sont remplis au travers de ce nouveau modèle mildiou. En effet, il intègre bien de nouvelles variables climatiques dont les effets sont essentiels dans le cycle de développement de *Plasmopara viticola*, prend en compte l'auto-limitation de la surface disponible pour son développement et fournit bien en sortie des données d'intensité de la maladie, de dates de contaminations et de durées d'incubation. En revanche, la phase de reproduction sexuée reste en suspend du fait d'une littérature peu riche à ce sujet. Il demeure donc impossible de prévoir d'éventuelles pertes d'inoculum au cours de l'hiver en fonction des conditions climatiques.

4 – 2 Perspectives de travail

Il conviendra tout d'abord de poursuivre les tests de comportement du modèle vis-à-vis de toutes les hypothèses posées pour différentes étapes du cycle. En effet, il semble par

exemple que la conceptualisation du phénomène de dispersion des zoospores (hauteur de souche, nombre d'étages foliaires touchés par l'inoculum) engendre des effets non négligeables sur les sorties du modèle. Par ailleurs, il semblerait que l'intensité de la maladie au 1^{er} septembre soit très largement liée aux contaminations secondaires. Bien qu'un formalisme permette d'introduire une dynamique de mortalité des sporocystes, ces données seront à approfondir afin de simuler peut être avec une plus grande précision l'intensité de la maladie en fin de saison.

En outre, le caractère déterministe du modèle peut poser problème. En effet, ce type de modèle ne fournit pas de réponses du type oui/non concernant les contaminations, que l'on pourrait avoir grâce à des modèles stochastiques, mais délivre des nombres d'individus. Tout le problème réside alors dans le choix éventuel d'un seuil en dessous duquel on considère que le nombre d'individus concernés est tellement faible qu'on peut l'approximer par zéro. Ainsi, un seuil de $10e-7$ a été choisi dans les modules de maturation (morphoMatureOospores), de germination (physioMatureOospores) et d'interception des zoospores par le couvert (airborneZoospores). Les calculs étant réalisés sur un cep moyen au dessus d' $1m^2$ de sol, cela revient à dire par exemple que le modèle considère qu'1 zoospore sur 10 ha ou plus ne peut pas être à l'origine d'une contamination. Il sera donc intéressant de vérifier l'impact de ce paramètre sur les sorties du modèle.

La robustesse du modèle devra être testée dans un contexte de base de données de validation plus fournie, pour permettre des phases de calibration des différents paramètres fixés pour chaque module par confrontation des sorties du modèle aux données de terrain. De plus, une analyse de sensibilité pourrait être menée afin de déterminer les paramètres les plus influents sur les sorties du modèle et donc pour lesquels une grande précision de mesure est nécessaire. Dans le même temps, ce type d'analyse permettrait de vérifier les premières tendances dégagées dans ce document sur l'effet de certains paramètres et ainsi peut être de confirmer l'idée selon laquelle par exemple le stock initial d'oospores n'influence pas beaucoup les sorties du modèle. Cette donnée reste difficile à évaluer avec précision par l'utilisateur. Dès lors, dans le cas où une telle analyse étayerait cette hypothèse, il serait alors possible de fixer la valeur de ce paramètre.

Par ailleurs, plusieurs améliorations pourront être apportées au modèle. La phase de reproduction sexuée devra être intégrée dans le modèle au gré des avancées des connaissances scientifiques, et l'implémentation du modèle SWEB pour simuler la durée d'humectation des feuilles devra être terminée. L'intégration de nouveaux formalismes sera d'autant plus facilitée que l'accent a été mis sur une grande modularité du modèle (cf II 2-2-1).

Par la suite, l'intégration du modèle de dynamique des produits phytosanitaires, et la simulation de l'impact des attaques de mildiou sur l'état physiologique du cep de vigne et sur les rendements à venir, rendront cet outil encore plus attrayant pour ses utilisateurs.

Enfin, la précision de ce nouveau modèle devra être confrontée à celle du modèle actuel. En cas de précision accrue ou de plus grande adéquation avec les attentes des utilisateurs, le nouveau modèle mildiou sera éventuellement intégré au logiciel ITK Protect selon les attentes du commanditaire. Le modèle informatique sera alors recomposé en une version industrielle dans laquelle, selon les besoins, de nouvelles fonctionnalités pour l'utilisateur seront apportées.

Dans le contexte actuel, le logiciel s'intègre parfaitement dans la démarche déjà engagée de changement des mentalités vis-à-vis de l'utilisation des produits phytosanitaires notamment en viticulture. Les sorties fournies par le modèle ont pour intérêt d'aider l'utilisateur à retarder le premier traitement à une date plus appropriée, ou d'espacer de façon optimale les traitements. Elles permettent également de protéger la vigne en cas d'attaque précoce, afin de préserver le rendement et la qualité du raisin. D'importantes économies en

matière de traitements phytosanitaires seront ainsi possibles. Par ailleurs, on assiste ces dernières années au développement de l'activité de conseils de la part des firmes phytosanitaires. Cet outil s'intègre dès lors très bien dans une optique de diversification des activités commerciales de ces entreprises.

REFERENCES

- AUBERTOT, J.N., BARBIER, J.M., CARPENTIER, A., GRIL, J.J., GUICHARD, L., LUCAS, P., SAVARY, S., SAVINI, I., VOLTZ, M. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p. 2005
- BLAISE, P., GESSLER, C. 1990. On the search for an applicable forecasting model of downy mildew epidemics on vines in Switzerland. IOBC Bull. In Press.
- BLOUIN, J. Les Parasites de la vigne : Stratégies de protection raisonnée. Editions Dunod, 2007. p. 196 pp. 448 ISBN : 978-2-1004-9995-3
- BUTAULT, J.P., DELAME, N., JACQUET, F., RIO, P., ZARDET, G., DEDRYVER, C.A., VOLAY, T., GARY, C., GUICHARD, L., PITRAT, M., SAUPHANOR, B. L'utilisation des pesticides en France : Etat des lieux et perspectives de réduction. Colloque de la SFER : Lyon 11-12 mars 2010 La réduction des pesticides : enjeux, modalités et conséquences.
- BOUMA, E., Computer aids for plant protection, historical perspective and future developments. 2007, Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 37, 247-254
- BOSO, S., KASSEMAYER, H.H. Different susceptibility of European grapevine cultivars for downy mildew. *Vitis*. 2008, Vol.47, p.39-49
- CALONNEC, A., CARTOLARO, P., NAULIN, J. M., BAILEY, D., LANGLAIS, M. A hostpathogen simulation model: powdery mildew of grapevine. *Plant Pathology*. 2008, Vol.57, 3, p.493-508
- CAFFI, T., ROSSI, V., COSSU, A., FRONTEDDU, F. Empirical vs. mechanistic models for primary infections of *Plasmopara viticola*. 2007, Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 37, 247-254
- CAFFI, T., ROSSI, V., LEGLER, S. E., BUGIANI, R. A mechanistic model simulating ascospore infections by *Erysiphe necator*, the powdery mildew fungus of grapevine. *Plant Pathology*. 2011, Vol.60, 3, p.522-531
- CAUBEL, J. Modélisation dynamique et générique de pathosystèmes fongiques aériens. Application à l'étude des impacts du changement climatique sur la rouille brune du blé et le mildiou de la vigne. 2012
- CONTRERAS-MEDINA, L.M., TORRES-PACHECO, I., GUEVARA-GONZALEZ, R.G., ROMERO-TRONCOSO, R.J., TEROL-VILLALOBOS, I.R., OSORNIO-RIOS, R.A. Mathematical modelling tendencies in plant pathology. *African Journal of Biotechnology*. 2009, Vol.8, p.7399-7408
- DAVIDOU, L., CRACHEREAU, J.C. Mise en évidence de l'impact qualitatif de la présence de mildiou en faciès rot brun sur les vins rouges de Bordeaux et détermination de seuils de tolérance. *Revue des œnologues*. 2011, n°139, p.16-19
- DE WOLF, E.D., ISARD, S.A. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annual review of phytopathology*. 2007, Vol.45, p.203-223
- DUBOS, B. Maladies cryptogamiques de la vigne: champignons parasites des organes herbacés et du bois de la vigne. 2ème édition. Bordeaux: Editions Féret, 2002. p. 17-32. ISBN : 978-2-9024-1677-6
- ESKER, P.D., SPARKS, A.H., ANTONY, G., BATES, M., DALL'ACQUA, W., FRANK, E.E., HUEBEL, L., SEGOVIA, V., GARRETT, K.A. Ecology and Epidemiology in R: Modeling dispersal gradients. *The Plant Health Instructor*. 2007.
- GALET, P. Les maladies et les parasites de la vigne - Tome 1 : Les maladies dues à des végétaux. Montpellier: Imprimerie du Paysan du Midi, 1977. 871 p.
- GAMM, M., Impact de *Plasmopara viticola* sur le métabolisme de l'amidon et le fonctionnement stomatique chez la vigne. 2011
- GARCIA DE CORTAZAR ATAURI, I., Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis Vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. 2006
- GESSLER, C., PERTOT, I., PERAZZOLLI, M. *Plasmopara viticola*: A review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathologia Mediterranea*. 2011, Vol.50, p.3-44
- GOBBIN, D., JERMINI, M., LOSKILL, B., RAYNAL, M., GESSLER, C. Importance of secondary inoculum of *Plasmopara viticola* to epidemics of grapevine downy mildew. *Plant Pathology*. 2005, Vol.54, p.522-534
- HILL, G.K. Effect of temperature on sporulation efficiency of oilspots caused by *Plasmopara viticola* (Berk. & Curt. ex de Bary) Berl. & de Toni in vineyards. *Viticultural and Enological Sciences*. 1989, Vol.44, p.86-90.
- JERMINI, M., BLAISE, P., GESSLER, C. Quantitative effect of leaf damage caused by downy mildew (*Plasmopara viticola*) on growth and yield quality of grapevine 'Merlot'

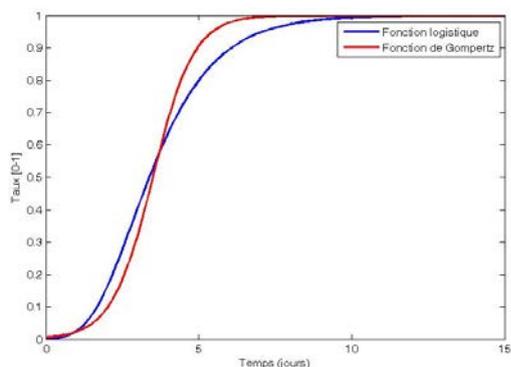
- (*Vitis vinifera*). *Vitis*. 2010, Vol.49, 2, p.77–85
- KENNELLY, M., GADOURY, D., WILCOX, W., MAGAREY, P., SEEM, R. Addressing the Gaps in our Knowledge of Grapevine Downy Mildew for Improved Forecasting and Management. Plant Management Network. 2007
- KENNELLY, M., GADOURY, D., WILCOX, W., MAGAREY, P., SEEM, R. Primary infection, lesion productivity, and survival of sporangia in the grapevine downy mildew pathogen *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*. 2007, Vol.97, 4 p.512-522
- KIEFER, B., RIEMANN, M., BUCHE, C., KASSEMAYER, H.H., NICK, P. The host guide morphogenesis and stomatal targeting in the grapevine pathogen *Plasmopara viticola*. *Planta*. 2002, Vol.215, p.387-393
- LALANCETTE, N., MADDEN, L.V., ELLIS, M.A. A quantitative model for describing the sporulation of *Plasmopara viticola* on grape leaves. *Phytopathology*. 1987, Vol.78, p.1316-1321
- LALANCETTE, N., ELLIS, M.A., MADDEN, L.V. Estimating infection efficiency of *Plasmopara viticola* on grape. *Plant Disease*. 1987, Vol.71, p.981-983
- LALANCETTE, N., ELLIS, M.A., MADDEN, L.V. Development of an efficiency model for *Plasmopara viticola* on American grape based on temperature and duration of leaf wetness. *Phytopathology*. 1988, Vol.78, p.794-800
- MADDEN, L.V. Effects of rain on splash dispersal of fungal pathogens. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1997, Vol.19, p.225-230
- MAGAREY, R.D., RUSSO, J.M., SEEM, R.C. Simulation of surface wetness with a water budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006, Vol.139, p.373-381
- MATASCI, C.L., JERMINI, M., GOBBIN, D., GESSLER, C. Microsatellite based population structure of *Plasmopara viticola* at single vine scale. *European Journal of Plant Pathology*. 2010, Vol., 127, p.501-508
- ORLANDINI, S., MASSETTI, L., DALLA MARTA, A. An agrometeorological approach for the stimulation of *Plasmopara viticola*. *Computers and electronics in Agriculture*. 2008, Vol.64, p.149-161
- PARK, E., SEEM, R. DMCAST: a prediction model for grape downy mildew development. *Viticultural and Enological Sciences*. 1997, Vol.52, p.182-189.
- PENNYPACKER, S.P., KNOBLE, H.D., ANTLE, C.E., MADDEN, L.V. A flexible model for studying disease progression. *Phytopathology*. 1980, Vol.70, p.232-235
- ROSA, M., GOZZINI, B., ORLANDINI, S., SEGHI, L. A computer program to improve the control of grapevine downy mildew. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1995, Vol.12, p.311-322
- ROSSI, V., CAFFI, T. The role of rain in dispersal of the primary inoculum of *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*. 2012, Vol.102, p.158-165
- ROSSI, V., CAFFI, T., GIOSUE, S., GIROMETTA, B., BUGIANI, R., SPANNA, F., DELLAVALLE, D., BRUNELLI, A., COLLINA, M. Elaboration and validation of a dynamic model for primary infections of *Plasmopara viticola* in North Italy. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*. 2005, Vol.3, p.7-13
- ROSSI, V., CAFFI, T., GIOSUE, S., BUGIANI, R. A mechanistic model simulating primary infections of downy mildew in grapevine. *Ecological Modelling*. 2008, Vol.212, p.480-491
- ROSSI, V., GIOSUE, S., CAFFI, T., Modelling the dynamics of infections caused by sexual and asexual spores during *Plasmopara viticola* epidemics. *Journal of Plant Pathology*. 2009, Vol. 91, n°3, p.615-627
- ROUZET, J., JACQUIN, D., 2003. Development of overwintering oospores of *Plasmopara viticola* and severity of primary foci in relation to climate. *IOBC/WPRS Bull.* 33, p.437–442
- ROUZET, J. Utilisation des modèles par les SRPV dans le cadre du conseil phytosanitaire: Bilan et perspectives. Colloque INRA ICTA SRPV Paris, 20-21 novembre 2006.
- RUMBOLZ, J., WIRTZ, S., KASSEMAYER, H.H., GUGGENHEIM, R., SCHAFFER, E., BUCHE, C. Sporulation of *Plasmopara viticola*: Differentiation and light regulation. *Plant Biology*. 2002, Vol.4, p.413-422
- SALINARI, F., GIOSUE, S., TUBIELLO, F.N., RETTORI, A., ROSSI, V., SPANNAS, F., ROSENZWEIG, C., GULLINO, M.L. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*. 2006, Vol.12, p.1299-1307
- SALL, M.A. Epidemiology of grape powdery mildew: A model. *Phytopathology*. 1979, Vol.70, p.338-342
- SAVARY, S. Modélisation en protection des cultures. Paris : ORSTOM, 1995, p. 141-156.

- (Colloques et Séminaires). Modélisation en Protection des Cultures : Séminaire International, Montpellier (FRA), 1994/05. ISBN 2-7099-1275-9
- TAMBOUR, L., HOULÈS, V., COHEN-JONATHAN, L., AUFFRAY, V., ESCANDE, P., JALLAS, E. Design of a Model-Driven Web Decision Support System in Agriculture: From Scientific Models to the Final Software. In P. J. Papajorgji, Pardalos P. M. (eds.). *Advances in Modeling Agricultural Systems*. New York: Springer US, 2009. p. 67-102
- TRAN MANH SUNG, C., STRIZYK, S., CLERJEAU, M., Simulations of the date of maturity of *Plasmopara viticola* oospores to predict the severity of primary infections in grapevine. *Plant Disease*. 1990, Vol. 74, n°2, p.120-124
- UNGER, S., BÜCHE, C., BOSO, S., KASSEMAYER, H.H. The course of colonization of two different *Vitis* genotypes by *Plasmopara viticola* indicates compatible and incompatible host-pathogen interactions. *Phytopathology*. 2007, Vol.97, p.780-786
- VAN MAANEN, A., XU, X.M. Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology*. 2003, Vol. 109, p.669-682
- VERCESI, A., TORNAGHI, R., SANT, S., BURRUANO, S., FAORO, F. A cytological and ultrastructural study on the maturation and germination of oospores of *Plasmopara viticola* from overwintering vine leaves. *Mycol. Res*. 1999, Vol.103, p.193-202.
- VIRET, O., SIEGFRIED, W. Fiche technique sur les maladies de la vigne: mildiou. *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture*. 28, (6), 1996, 373-374
- WONG, F.P., BURR, H.N., WILCOX, W.F. Heterothallism in *Plasmopara viticola*. *Plant Pathology*. 2001, Vol.50, p.427-432

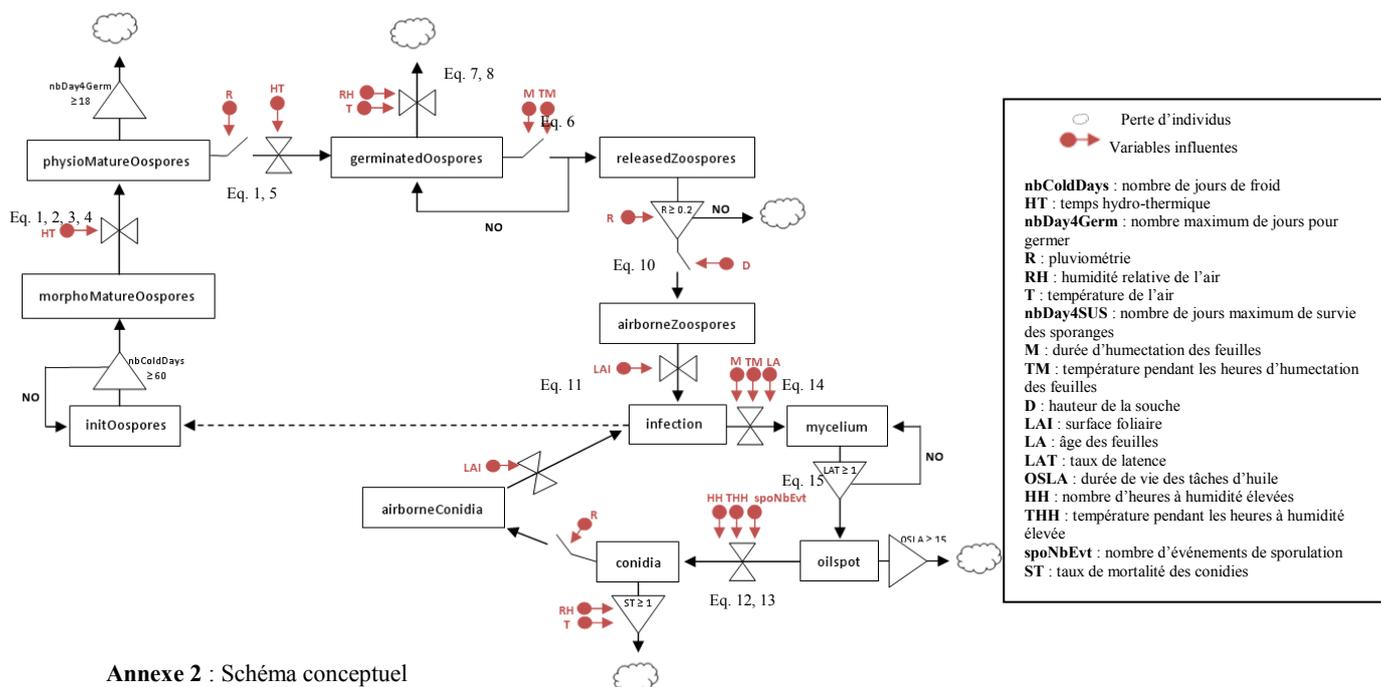
Sites Internet:

- Site Internet n°1 : http://ec.europa.eu/agriculture/envir/cross-compliance/index_fr.htm
(Dernière visite le 17 août 2012)
- Site Internet n°2 : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2012T8-2.pdf>
(Dernière visite le 15 août 2012)
- Site Internet n°3 : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_primeur230.pdf
(Dernière visite le 22 août 2012)
- Site Internet n°4 : <http://www.franceagrimer.fr/fam/filiere-vin-et-cidriculture/Vin/La-filiere-en-bref/Le-marche-du-vin-en-2010>
(Dernière visite le 15 août 2012)
- Site Internet n°5 : <http://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/mildiou.php>
(Dernière visite le 09 août 2012)
- Site Internet n°6 : http://ephytia.inra.fr/vigne/vigne_utilisateur/index_appli.php?portail=CULTURES%20FRUITIERES&produit=vigne&main=271&ssrub1=460&ssrub2=461
(Dernière visite le 15 août 2012)
- Site Internet n°7 : <https://www.inao.gouv.fr/fichier/PNOCDC-AlsaceHierarchisation.pdf>
(Dernière visite le 22 août 2012)
- Site Internet n°8 : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021218369>
(Dernière visite le 22 août 2012)

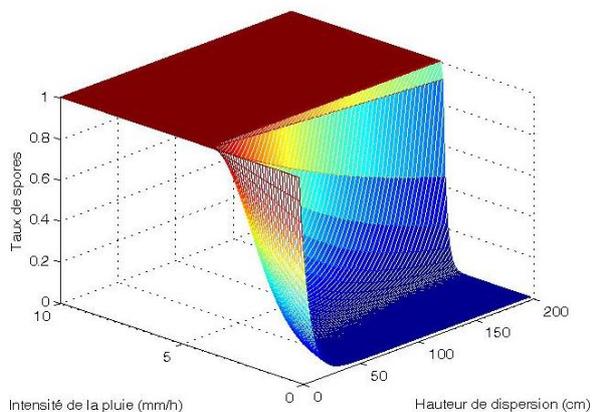
ANNEXES



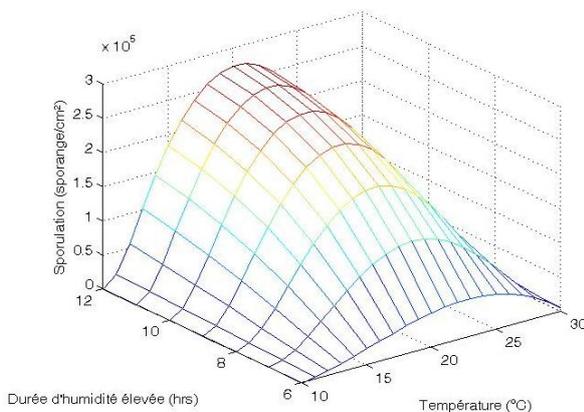
Annexe 1 : Comparaison entre fonctions logistique et de Gompertz



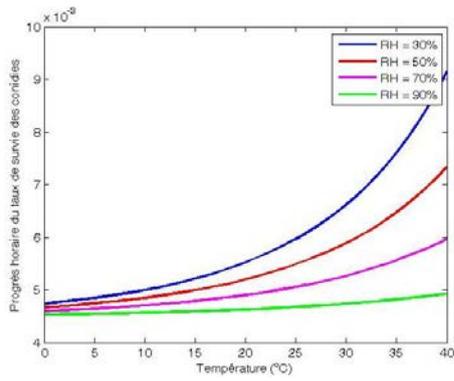
Annexe 2 : Schéma conceptuel



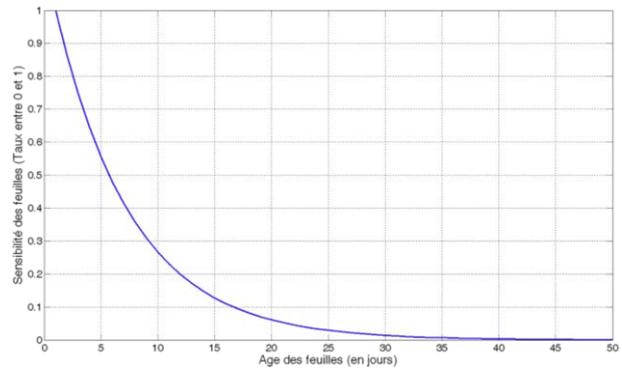
Annexe 3 : Répartition des spores à différentes hauteurs en fonction de l'intensité de la pluie



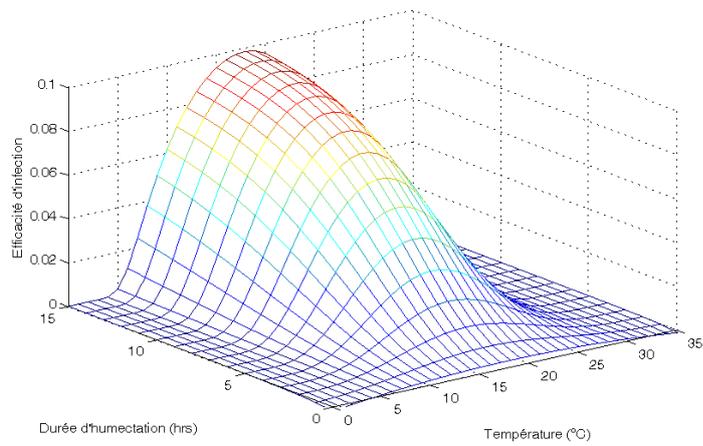
Annexe 4 : Production de conidies en fonction de la température et de la durée d'humidité élevée au cours de la nuit



Annexe 5 : Progrès du taux de survie des conidies en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air



Annexe 6 : Sensibilité des feuilles aux attaques de mildiou en fonction de leur âge



Annexe 7 : Efficacité de l'infection modulée par la durée d'humectation des feuilles et la température de l'air