



## RÉSUMÉ

L'oïdium constitue le principal problème phytosanitaire de la culture du fraisier. En effet, la difficulté à déceler précocement la présence du champignon, l'absence de fongicides performants et de variétés résistantes rendent problématique la protection du fraisier. De multiples travaux conduits ces dernières années (en particulier un dossier multidisciplinaire soutenu par le Casdar porté par le Ctifl sur la période 2006-2008) par les équipes de recherche appliquée ont permis de mieux connaître le champignon. Certaines de ces études ont servi à améliorer un outil de prévision du risque oïdium mis en chantier par le Ctifl en partenariat avec InVenio en 2002. La détermination des conditions favorables au champignon et l'élaboration des courbes de risque sont présentées à partir du modèle expérimental.

## STRAWBERRY POWDERY MILDEW

Powdery mildew is the main problem in strawberry crop protection. The fungus is particularly difficult to detect early on, and there are neither efficient fungicides, nor resistant varieties. Many studies (notably a Casdar-funded cross-discipline programme coordinated by Ctifl over the period 2006-2008) conducted by applied research teams have led to better knowledge of the pathogen. Some of the results obtained were used to improve a risk prediction model initiated by Ctifl and InVenio in 2002. Favourable conditions for the fungus and risk curves are presented on the basis of the experimental model. Until recently, conditions of development of strawberry powdery mildew remained largely unknown, but new insights are enabling us to provide strawberry growers shortly with a brief risk prediction tool.

Avec la collaboration de Yannick Trottin-Caudal (Ctifl) ; Renata Dos Santos Brito (Ctifl-Isab-Lassale)

## L'OÏDIUM DU FRAISIER

# UN OUTIL DE PRÉVISION DU RISQUE

*La maîtrise d'un ravageur ou d'une maladie sera d'autant plus efficace que les conditions de vie de ce ravageur ou de cette maladie seront mieux appréhendées et modélisées. L'amélioration des connaissances de l'épidémiologie de l'oïdium du fraisier a permis d'aboutir à un outil de prévision du risque de la maladie.*



> PREMIERS SYMPTÔMES D'OÏDIUM SUR JEUNES FEUILLES ADULTES

## UNE MALADIE DU FRAISIER PRÉPONDÉRANTE

La culture du fraisier est sujette à de nombreux bio-agresseurs aériens et telluriques. Parmi les ravageurs pucerons, thrips et tarsonèmes sont les plus difficiles à contrôler. En ce qui concerne les maladies, si le botrytis et le colletotrichum sont jugulés assez facilement, ce n'est pas le cas du verticillium, des phytophthoras et de l'oïdium.

En effet, l'oïdium constitue actuellement le problème phytosanitaire dominant de la culture du fraisier. Son incidence est particulièrement notable et se traduit par une forte réduction du potentiel de rendement et par des fruits déclassés.

Rappelons que l'oïdium du fraisier est provoqué par un champignon appartenant au groupe des Ascomycètes, à la famille des Erysiphacées et au genre *Podospaera*. Il est assez spécifique du genre *Fragariae* et possède plusieurs synonymies: *Podospaera aphanis*, *S. macularis* (Wallr. Ex FR.) W. B. Cooke,

*Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae*, *Podospaera macularis* (Braun & Takamatsu, 2000). C'est un ectoparasite obligatoire du fraisier qui nécessite des tissus végétaux vivants pour rester viable et se développer. Ce statut parasitaire rend difficiles les études sur cet agent pathogène au laboratoire.

La protection du fraisier contre ce parasite reste problématique pour des raisons différentes: difficulté de déceler précocement la présence du champignon, absence de fongicides curatifs ou éradiquants performants, systèmes de culture très favorables au développement du champignon (hors sol et variétés de productions estivales). De nombreux travaux sont menés sous les angles de la recherche de fongicides efficaces, de méthodes complémentaires et de prévision pour élaborer des stratégies de protection efficaces.

L'article a pour objet de présenter l'état d'avancement du travail engagé en 2002 par le Ctifl en partenariat avec InVenio (ex-CIREF) pour la mise au point d'un outil de prévision de la maladie oïdium.



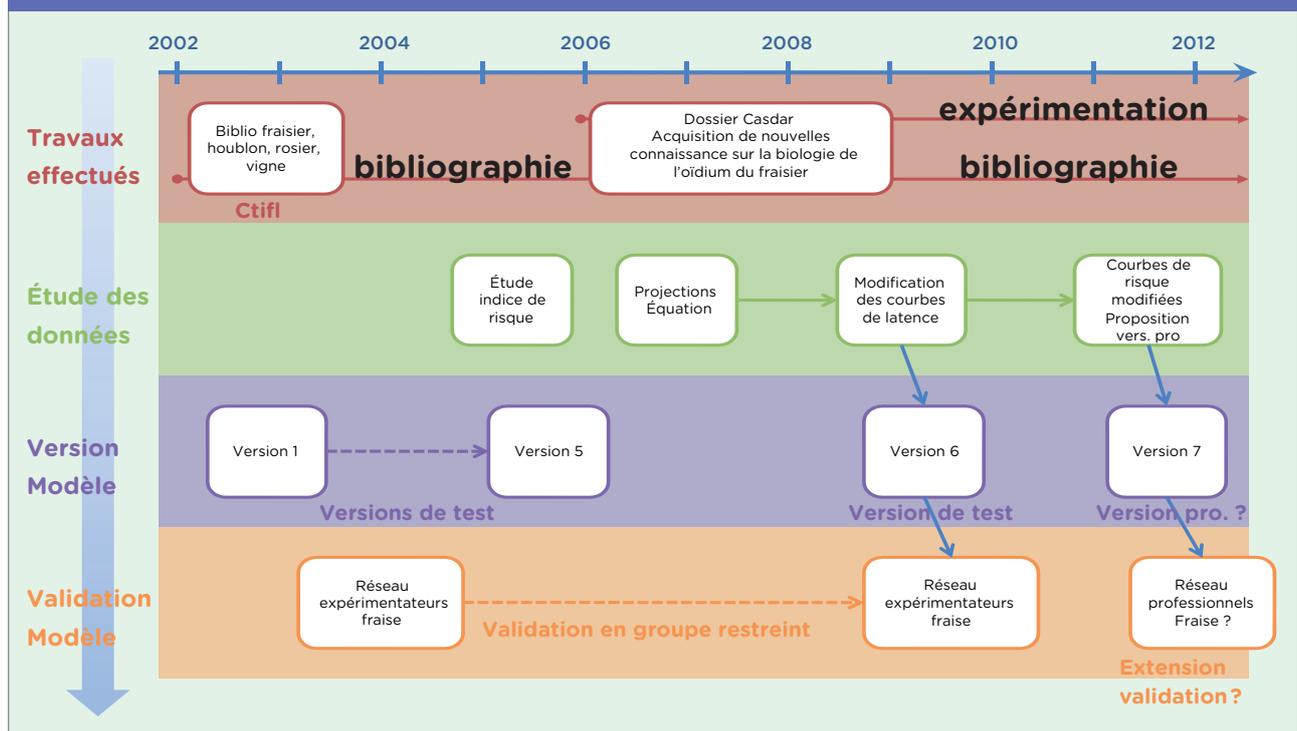
> APPARITION DISCRÈTE DE LA SPORULATION SUR JEUNES FEUILLES

## UN OUTIL DE PRÉVISION DE LA MALADIE OÏDIUM

Du fait de la difficulté de mener des études sur les champignons parasites obligatoires, les connaissances sur l'épidémiologie de l'oïdium sont restées restreintes jusqu'à récemment. Ainsi, en l'absence d'autres références, la toute première version du modèle oïdium du fraisier a d'abord été élaborée à partir des références bibliographiques concernant des oïdiums proches de celui du fraisier:

FIGURE 1 : Historique des travaux effectués sur le modèle oïdium du fraisier

Source : Ctifl





oïdium du houblon plus particulièrement, mais aussi oïdium du rosier, du concombre, du groseillier et de la vigne. À partir du milieu des années 2000 de nouvelles références ont été acquises. En France, un dossier multidisciplinaire soutenu par le Casdar sur la période 2006-2008 a permis en rassemblant des équipes de l'INRA, du Ctifl, du CIREF-Cv, d'InVenio et de six chambres d'agriculture, d'améliorer profondément les connaissances sur la biologie, le cycle parasitaire et l'épidémiologie du champignon. Le modèle oïdium du fraisier a profité pleinement de ces nouveaux acquis en particulier pour l'appréciation de la durée d'incubation et la succession des cycles. La figure 1 rappelle l'historique des travaux effectués sur le modèle oïdium du fraisier.

La plate-forme de modélisation Inoki a accueilli et accompagné les développements de ce modèle de simulation de maladie dès le départ. La facilité d'intégration et de modification des modèles offerte par cette plate-forme autorisent en effet la mise à disposition d'outils d'aide à la décision dès les phases de prototypage. Elle simplifie aussi la phase de mise en production de ces outils. Celle-ci ne devient qu'une petite étape complémentaire parmi toutes les phases de développement de l'outil.

### UN MODÈLE BASÉ SUR LE CYCLE DU CHAMPIGNON

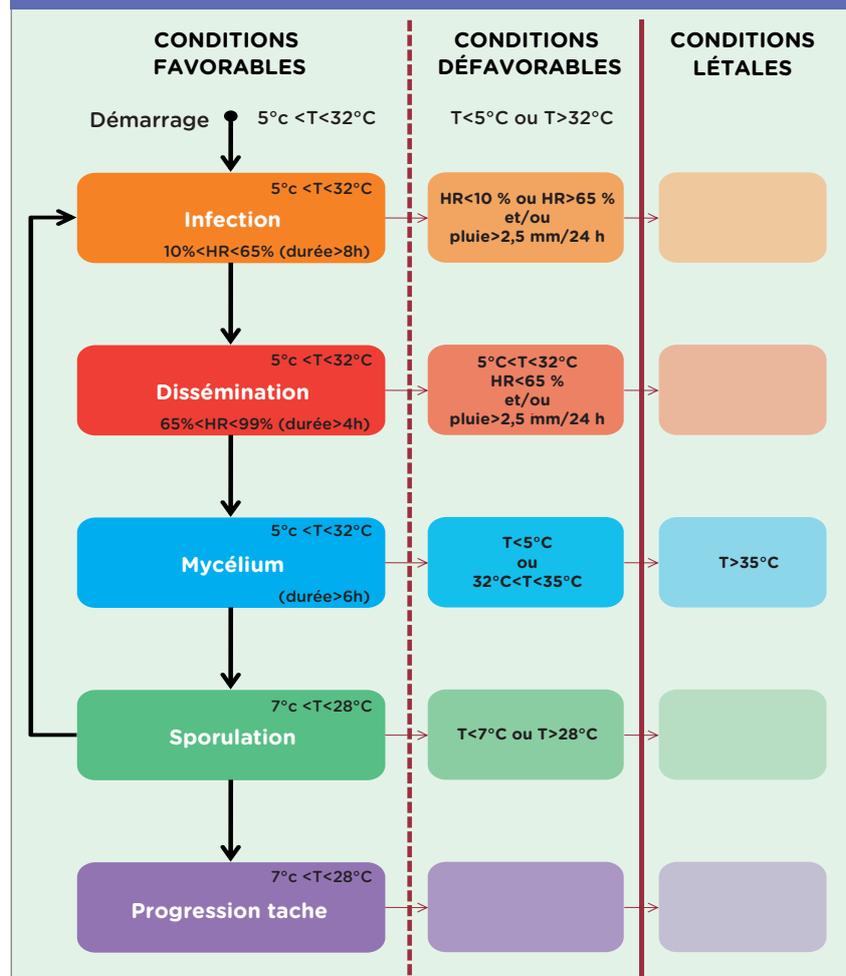
L'outil de prévision est découpé en cinq compartiments correspondant aux étapes de la partie asexuée du cycle de développement du champignon (Figure 2) :

- Phase de dissémination;
- Phase d'infection;
- Phase d'installation du mycélium;
- Phase de sporulation;
- Phase de progression de la tache.

Les études ont montré que le champignon a la capacité de s'installer dans la plage de température allant de 5 °C à 32 °C mais que la sporulation n'apparaît qu'entre 7 °C et 28 °C. Le mycélium peut continuer à croître entre 32 et 35 °C. Au-delà de 35 °C le mycélium et les conidies sont détruits. Le mycélium bloqué durant

**FIGURE 2 :** Conditions favorables au développement de l'oïdium du fraisier

Source : Ctifl



une période où les températures oscillent entre 28 et 35 °C a la possibilité de sporuler rapidement lorsque les températures redescendent en dessous de 28 °C. La figure 2 schématise les conditions favorables au développement de l'oïdium.

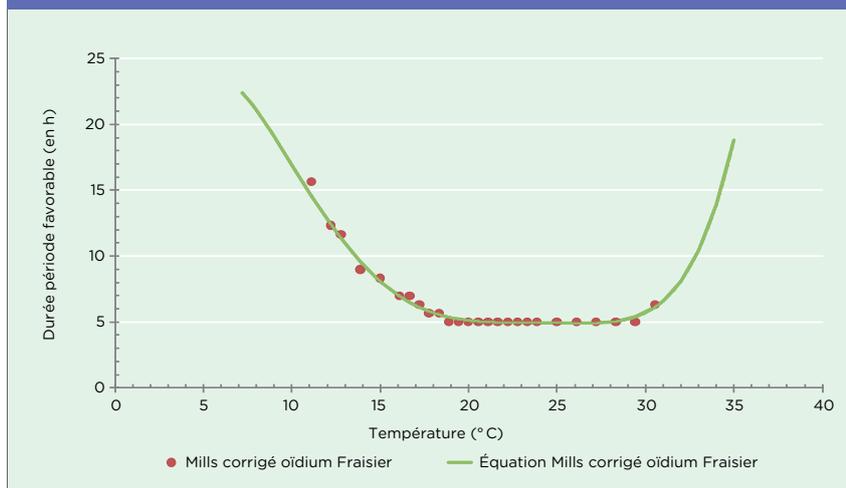
Le taux d'humidité relative de l'air ambiant va intervenir essentiellement au moment de l'installation du champignon : phases de dissémination et d'infection. La dissémination des spores se fera en condition d'air peu chargé en humidité. Le seuil maximal accepté par le modèle est paramétré à 65 % sur une durée minimale de huit heures. Les conidies déposées sur un nouvel organe doivent émettre un tube germinatif et installé et un haustorium dans les

cellules épidermiques pour provoquer l'infection. La germination des spores est optimum (Miller 2002) à une valeur d'humidité proche de la saturation, mais elle peut débuter pour des valeurs humidité relatives au-dessus de 85 %. Cette fourchette de valeur est supposée être fréquente à la surface de la face inférieure des feuilles (forte densité de stomates permettant les échanges gazeux – O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O – entre la feuille et l'air ambiant). L'humidité de l'air à la surface de la feuille étant difficilement mesurable avec les sondes actuelles, elle est relevée dans l'air à l'intérieur de la végétation et le modèle est paramétré pour compenser cette ambiance moins humide, avec un seuil de 65 % au lieu



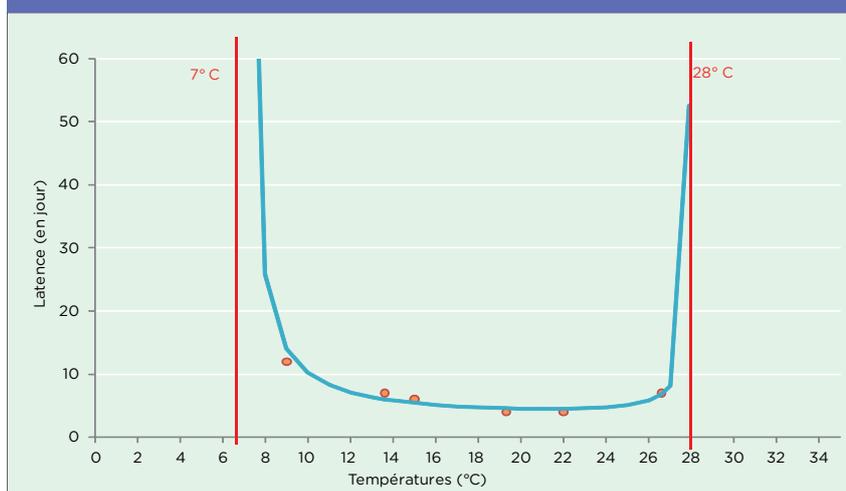
**FIGURE 3 :** Rapidité de germination en fonction de la température

Source : Ctifl



**FIGURE 4 :** Évolution du temps de latence en fonction de la température

Source : Ctifl



de 85 % pour une période d'au moins cinq heures. La rapidité de germination est fonction du niveau de température. La courbe proposée pour des oïdiums du houblon et de la vigne a été ajustée avec des valeurs spécifiques pour le fraisier relevées dans la bibliographie. La figure 3 présente le temps nécessaire à la germination des conidies en fonction de la température (courbe de Mills corrigée oïdium du fraisier). Cette équation est intégrée au modèle pour définir la possibilité ou non d'infection.

L'infection installée, un mycélium se développe plus ou moins rapidement en fonction des conditions de température, pour produire des conidiophores, sorte de chapelets de conidies dressés: c'est la sporulation. Le temps de latence correspond à la période écoulée entre le dépôt de spores sur l'organe et l'apparition des premiers conidiophores. Le dossier Casdar « oïdium » signalé précédemment a permis de modéliser plus précisément le temps de latence (TL) en fonction de la température. L'étude a montré que la sporulation n'avait

lieu que dans la plage de température de +7 °C à +28 °C: le temps de latence minimum (4 jours) se situe aux environs de 22 °C. Plus les températures s'éloignent de cette valeur plus la durée du TL s'allonge. Entre 5 et 7 °C, le mycélium peut s'installer mais ne sporule pas. De même au-dessus de 28 °C la sporulation n'a pas lieu. La figure 4 schématise l'évolution du temps de latence en fonction de la température.

Au début de la sporulation, les conidiophores ne sont pas visibles à l'œil nu. Ils sont observables sous loupe binoculaire à partir d'un grossissement de 20 fois (x 20). La progression de la tache, qui correspond d'une part à la densification des conidiophores et à leur apparition sur une plage plus large est également fonction de la température. Une tache blanche commence alors à être visible à l'œil nu. La figure 5 montre les résultats de la modélisation de la progression de la tache selon la température (par ajustement de l'équation de Weibull) avec les données sur le fraisier. La partie sexuée du cycle n'a pas été approfondie pour le moment. Elle conduit à l'élaboration par le champignon d'ascospores (cleistothèces), organe de conservation longue durée contenant 8 spores.

### UN MODÈLE EXPÉRIMENTAL AVANT L'OUTIL PROFESSIONNEL

L'algorithme du fonctionnement du modèle suit de près les conditions climatiques de développement de chaque partie du cycle du champignon schématisé par la figure 2. Pour cela les calculs sont basés sur les données climatiques horaires de la température, de l'humidité relative de l'air et de la pluviométrie éventuelle.

### LES SORTIES DU MODÈLE ACTUEL

Dans le cas du modèle expérimental chaque événement est matérialisé jour après jour sur le graphique de synthèse. En bas du graphique, lorsque les conditions sont favorables à:

- la dissémination, une plage vert clair apparaît;
- l'infection, une plage verte apparaît;
- la croissance du mycélium, une plage vert foncée apparaît.

Lorsque les conditions sont favorables à



> TACHES SPORULANTES

l'infection (température et humidité) sans conditions défavorables durant la journée (absence de pluviométrie) alors le graphique positionne une croix rouge. Un temps de latence théorique est calculé et est matérialisé par un histogramme à deux niveaux superposés (TL tache visible œil nu puis TL premiers conidiophores). Ce temps de latence est moyenné jour après jour à partir de l'infection potentielle et un triangle rouge est positionné lorsque ce temps de latence est atteint après l'infection. Un triangle rouge plein matérialise la tache visible à l'œil nu deux à trois jours plus tard. La matérialisation de nouveaux cycles s'effectue quand le modèle détermine l'apparition de conidiophores, il relance les calculs pour la contamination secondaire, puis tertiaire... Les événements du nouveau cycle sont visualisés à une hauteur juste supérieure à la précédente.

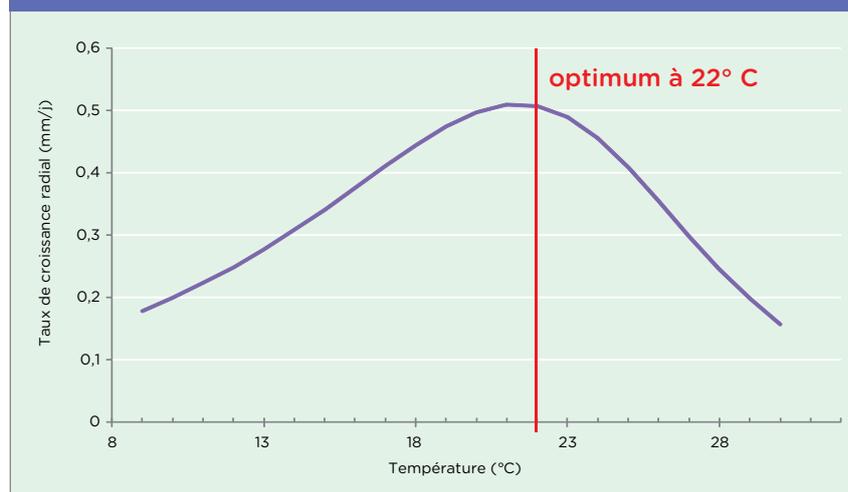
Sur le graphique du modèle expérimental peuvent être également affichées les observations des conidiophores décelés à la loupe et des taches blanches respectivement sous forme de losanges et de ronds. De la même façon, en précisant les dates des applications phytosanitaires et leur durée d'efficacité (en jours), un sur-lignage en filigrane formé par un rectangle vertical indiquera la plage de protection théorique suivant le traitement: il sera de couleur verte pour les traitements préventifs et jaune pour les traitements curatifs.

#### LES INDICES DE RISQUES

En termes de prévision du risque d'apparition et développement de la maladie, le travail effectué cette année a eu pour

**FIGURE 5 :** Progression de la tache en fonction de la température

Source : Ctifl



objet de redéfinir ce que devait prendre en compte un indice de risque, quels en étaient les éléments modulateurs et sur quelle période le calculer.

Tout d'abord, il paraît pertinent que le risque prenne en compte de manière séparée les conditions favorables à l'infection, à l'installation du mycélium aboutissant à la sporulation et au développement de la tache. Chaque stade a une valeur soit de « 5 » si les conditions sont propices à l'oïdium et « 0 » en dehors de ces limites. Chaque stade a une modulation propre. Ainsi pour le compartiment « infection », un coefficient (Ci) égal à 1 sera attribué en conditions très favorables au champignon (température entre 20 et 26 °C et HR entre 85 et 99 %) et égal à 0,5 en conditions moins favorables. Le compartiment « latence » (mycélium + 1° sporulation) est modulé par une valeur (Cl) entre 0 et 1 obtenue par le rapport entre le temps de latence minimale (4 jours à 22 °C) et le temps de latence du jour. Le taux de croissance de la tache (Ct) est utilisé soit pour moduler le compartiment « développement de la tache », soit comme modulateur complémentaire du compartiment « latence ». Ces éléments ont conduit à étudier les trois équations d'indice de risque présentées dans le tableau 1.

L'étude a porté aussi sur la période de calcul de ces trois types de risque. Les

périodes considérées étaient soit le jour même, soit une période de quatre jours dans ce cas le risque correspondait à une moyenne glissante sur les quatre derniers jours, soit le risque était cumulé au fil du temps. Précisons que le choix de quatre jours s'explique, d'une part, par le pas de temps minimum d'apparition de jeunes feuilles en période de forte croissance du fraisier et, d'autre part, par la durée minimale du temps de latence du champignon. Dans tous les cas l'indice de risque était calculé en pourcentage du risque maximal espéré sur la période.

Ces équations ont été testées avec des jeux de données obtenus dans les essais conduits en 2006 et 2007 sous tunnel simple et serre verre (INRA de Bordeaux dossier Casdar) et en 2010 sous tunnels

**TABLEAU 1 :** ÉQUATIONS ÉTUDIÉES DE L'INDICE DU RISQUE

Indice de Risque	Équation
n° 1 (IR1)	$Rinf + (Rlat \times Ci) + (RTac \times Ct)$
n° 2 (IR2)	$Rinf + (Rlat \times Ci)^{Ct}$
n° 3 (IR3)	$Rinf \times Ci + (Rlat \times Ci)^{Ct}$

Rinf : Risque infection

RLat : Risque latence

Cl : Coefficient latence

RTac : Risque tache

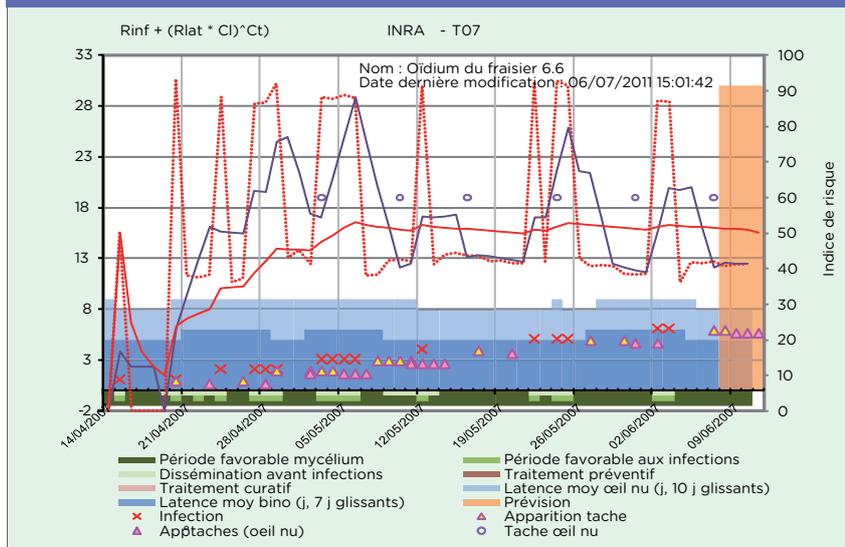
Ct : Taux de progression de la tache

Ci : Coefficient d'infection



**FIGURE 6** : Modèle expérimental pour l'indice de risque IR2 = Rinf + (Rlat x CI) <sup>(Ct)</sup>

Source : Ctifl



> POSITIONNEMENT DU CAPTEUR CLIMATIQUE

de type 5 m jumelés. Dans tous les cas, le même protocole d'observations a été appliqué et correspondait à acquérir des relevés horaires pour les paramètres climatiques température (en °C), humidité

relative de l'air (en %) et à noter à minima une fois par semaine l'évolution de la maladie sous les angles de l'incidence (% de feuilles contaminées) et de la sévérité (importance de la tache).

La figure 6 présente à titre d'exemple, une simulation du modèle pour une expérimentation (les graphiques correspondant aux autres équations étudiées, IR1 et IR2, ne sont pas montrés ici). Les trois pas de temps ont été ainsi étudiés (quotidien, moyenne glissante sur quatre jours et cumulé). L'approche graphique montre que les calculs cumulés au fil du temps des trois équations conduisent à des courbes d'indice de risque très stables ne reflétant pas l'évolution théorique de la maladie. Inversement dans le cas des courbes calculées journalièrement, l'indice de risque semble varier trop rapidement et passer d'un indice faible à un indice fort sans transition. L'indice de risque moyenné sur une période glissante de quatre jours a paru être le meilleur indicateur. Ces éléments semblent également montrer la plus grande pertinence de l'équation IRG2, par une sensibilité plus forte dans les seuils hauts en particulier.

**LE CHOIX D'UN INDICE DE RISQUE**

Pour évaluer statistiquement la pertinence des différents modes de calcul, des recherches de corrélations ont été effectuées entre les résultats des calculs des indices de risque et le développement correspondant de la maladie exprimée en incidence et en sévérité. Pour se faire nous avons utilisé le module analyse en composante principale (ACP) du logiciel StatBox® qui permet de calculer une matrice des coefficients de corrélation de Pearson.

Le tableau 2 présente les corrélations obtenues, tous essais confondus entre les trois Indices de risque (cumulé, quotidien et glissant/4 jours) des 3 équations et l'importance de la maladie exprimée soit en incidence soit en sévérité.

Cette analyse statistique conforte l'in-

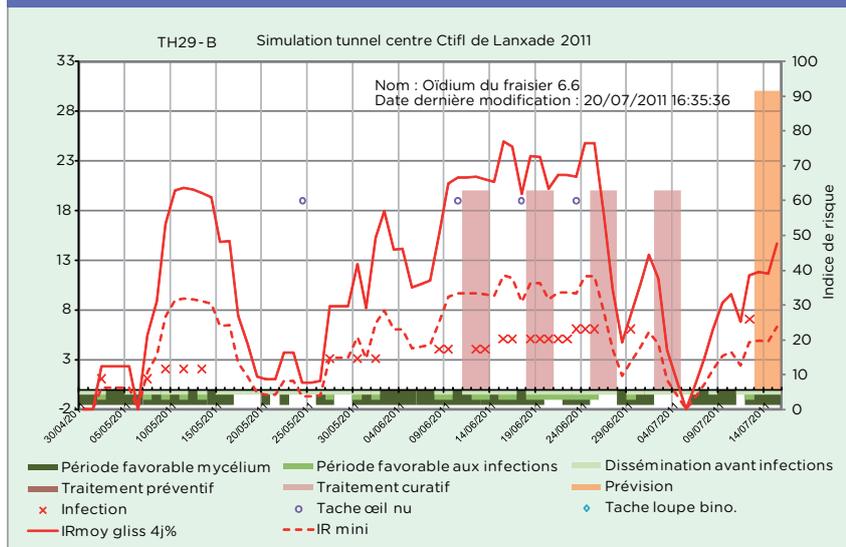
**TABEAU 2 : MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE PEARSON**

équations	IR1			IR2			IR3		
	quotidien	cumulé	Glissant/4j	quotidien	cumulé	Glissant/4j	quotidien	cumulé	Glissant/4j
sévérité	0,34	0,49	0,35	0,30	0,64	0,39	0,24	0,35	0,29
incidence	0,29	0,28	0,29	0,29	0,53	0,35	0,21	0,29	0,22

En gras valeur de corrélation significative au seuil  $\alpha = 0,05$

**FIGURE 7 :** Projet de version professionnelle - utilisation de l'indice de risque IR2 glissant sur 4 jours. La latence et les apparitions de taches disparaissent pour une meilleure lisibilité

Source : Ctifl



interprétation visuelle des graphiques en décelant de meilleurs coefficients de corrélation pour les calculs « cumulé » et « glissant/4 jours » de l'équation 2 par rapport à ceux des équations 1 et 3. Les calculs « quotidien » des indices de risque des 3 équations ne sont pas suffisamment significatifs. La valeur des coefficients de corrélation est en faveur du mode de calcul « cumulé ». Ceci s'explique par le fait d'un indice de risque cumulé quasi toujours croissant face à des valeurs d'observations (incidence ou sévérité) elles aussi croissantes (parcelle témoin non protégée). L'inconvénient de ce calcul est de produire une valeur stable au cours du temps et peu représentative des événements prévisionnels favorables ou non à la maladie. Dans le cas du calcul en mode « glissant/4 jours » les corrélations sont également significatives. L'indice, moyenné sur 4 jours seulement prend en compte plus fortement les variations des événements ce qui génère de moins bons coefficients de corrélation. Toutefois cette équation (IR2) calculée sur une période glissante de 4 jours est choisie pour sa pertinence dans l'évaluation de l'indice de risque. Si aucune variété de fraisier n'est résistante à l'oïdium, elles n'ont pas pour autant la même sensibilité. Aussi, il est

proposé d'afficher un risque complémentaire modulé par un coefficient paramétré à une valeur de « 0,5 » pour les variétés les moins sensibles. La figure 7 présente une simulation effectuée avec la nouvelle version du modèle expérimental où figurent un indice de risque maximal (variétés très sensibles) et un indice de risque modéré (variétés moins sensibles).

Le groupe de travail mis en place à la création du modèle et en charge de tester la pertinence de l'outil rassemble à coté des équipes du Ctifl, les expérimentateurs de InVenio, LCA, APREL, SECL et plus récemment de la SEFRA. Ce groupe devra continuer à évaluer l'outil dans sa nouvelle version en particulier en intégrant son utilisation dans les stratégies de protection du fraisier contre l'oïdium.

### UNE VERSION PROFESSIONNELLE QUI SE DESSINE

La même figure 7 présente cette version simplifiée où apparaissent les points importants en termes de prévision. Les périodes favorables à la dissémination, à l'infection et au développement du mycélium sont matérialisées respectivement par des plages vert pâle, vert clair et vert

foncé positionnées au bas du graphique. Les courbes d'Indice de risque maximal et minimal sont tracées jour après jour. Les traitements phytosanitaires peuvent apparaître sur le graphique sous réserve d'entrer leur date d'application et leur durée (en jour) d'efficacité. Ils figurent sous forme de rectangle vertical rose posé à la date du traitement et s'étalant sur la période d'efficacité. Sur la partie droite du graphique se situe une zone de réelle « prévision » où les indicateurs cités précédemment sont estimés pour les trois prochains jours à partir des conditions climatiques moyennées sur les trois jours précédents.

Le modèle de simulation de l'oïdium du fraisier est parti en 2002 d'une feuille vierge pour aboutir en 2011 à un outil finalisé utilisable par les fraisiiculteurs. Entre les deux, faute de références, un travail considérable a dû être mené pour défricher les domaines indispensables à la compréhension de la maladie. Le modèle a été découpé en autant de compartiments que de stades du champignon. Les indices de risque formalisent de façon intelligible les événements du modèle pour être à même d'en extraire des décisions. L'objectif final est de pouvoir proposer rapidement un outil que les fraisiiculteurs pourront utiliser facilement. Les nouvelles problématiques résident donc dans l'organisation du réseau météo : l'implantation de stations météo *in situ*, le positionnement adéquat des capteurs et le rapatriement quotidien des données climatiques demandent ainsi à être testé auprès d'un groupe restreint de professionnels. ■

### BIBLIOGRAPHIE

Miller T.C. and Gubler W.D. 2002. Effects of Temperature and water pressure on conidial germination and lesion expansion of *Sphaerotheca macularis* f. sp. *Fragariae*. *Plant disease* - vol. 87 n°5 ; p. 484-492

Bardet A. et al. 2010. L'oïdium du fraisier. *Infos-Ctifl* n°261 mai 2010, p. 50-55.

Vibert J. ; 2005. *Modèle oïdium du fraisier (version 5). Document interne Ctifl.*