CÉLINE JANVIER, JÉRÔME VIBERT,
CTIFL

INFOS CTIFL
JUIN 2011 N°272

PRÉVISION DES RISQUES DE ROUILLE EN CULTURE DE POIREAU

UN MODÈLE POUR OPTIMISER LA MAÎTRISE SANITAIRE

RÉSUMÉ

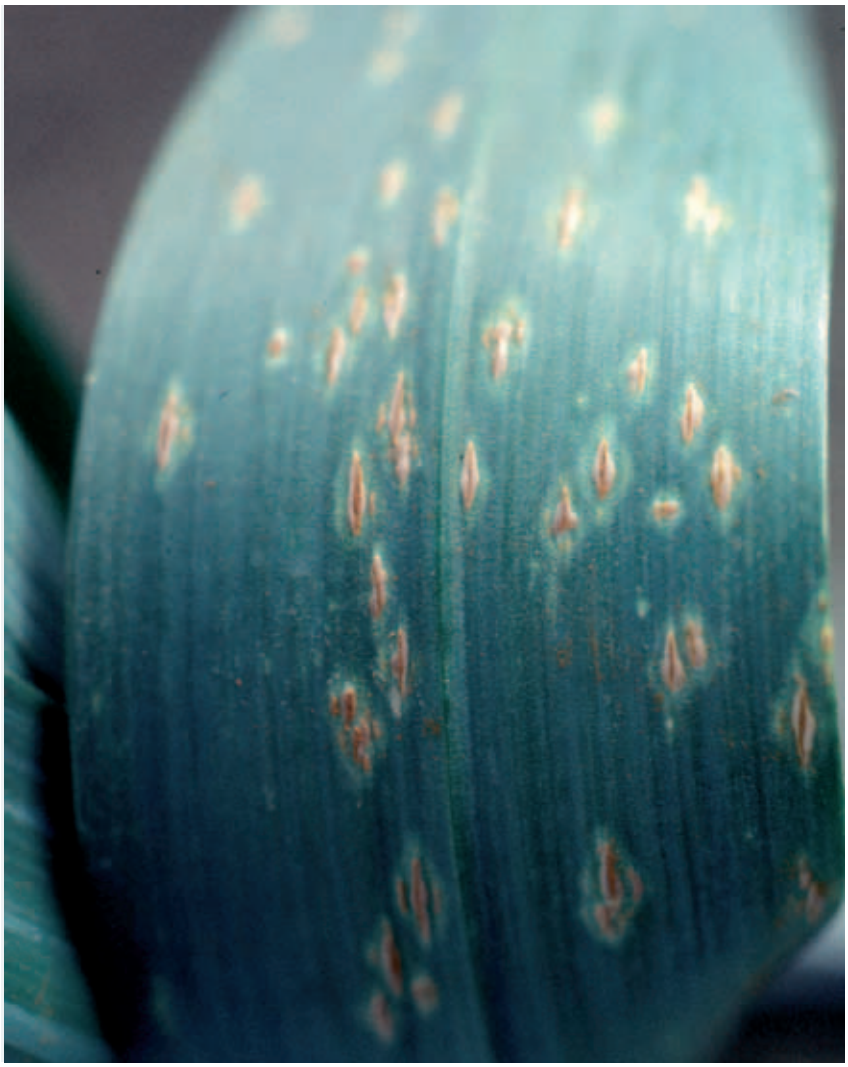
La rouille du poireau est l'un des problèmes majeurs sur cette culture. Dans un objectif de meilleure compréhension du déroulement des épidémies, et afin de gérer au mieux les stratégies de maîtrise sanitaire, le Ctifl et ses partenaires Sileban et Fredon Nord – Pas-de-Calais travaillent depuis 2003 sur un modèle de prévision des risques, qui entre en phase de pré-lancement en 2011. Cet article montrent comment ce modèle a été construit, les informations qu'il délivre, et sous quelle forme il sera proposé aux utilisateurs.

PREDICTING RISKS OF RUST IN LEEK CROPS : A MODEL FOR OPTIMISING THE MANAGEMENT OF SANITARY CONTROL

Leek rust is one of the major problems for this crop. In order to better understand the development and evolution of epidemics and optimise the management of sanitary control strategies, Ctifl and its partners Sileban and Fredon Nord–Pas-de-Calais have been working since 2003 to develop a risk prediction model, which is entering the pre-launch phase in 2011. This article shows how the model was developed, the type of data it provides, and the form in which it will be made available to users.

Les auteurs remercient N. Aubrée (Sileban), C. Milleville (Fredon Nord – Pas-de-Calais) et M. Legrand (Fredon Nord – Pas-de-Calais) pour leur collaboration.

En 2011, le modèle de prévision des risques liés aux épidémies de rouille sur culture de poireau est en ligne sur le serveur de modèle Inoki®, et accessible en phase de pré-lancement aux expérimentateurs, avant une exploitation prévue à partir de 2012.



> PUSTULES DE ROUILLE SUR UNE FEUILLE DE POIREAU

CÉLINE JANVIER, JÉRÔME VIBERT,
CTIFL

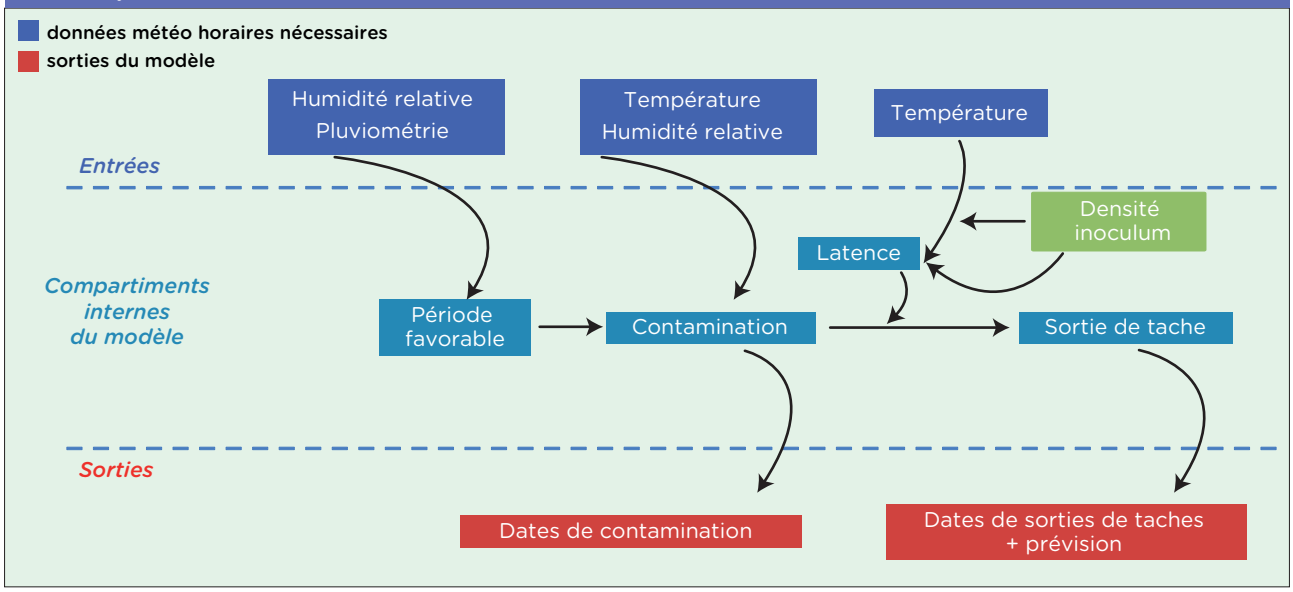
CONTEXTE GÉNÉRAL

La rouille est la maladie la plus répandue et l'une des plus préjudiciables pour les cultures de poireaux en France et dans toute l'Europe. En année propice à cette maladie, le manque à gagner pour les producteurs peut être important : outre les frais d'épluchage supplémentaire, il faut ajouter une baisse parfois notable du rendement (jusqu'à 20 %).
Sur le terrain, la maladie se manifeste d'abord sous forme de petits points chlorotiques verts clairs. Ces points s'agrandissent un peu et virent ensuite au jaune. Par la suite, des pustules orangées plus ou moins foncées se forment. Elles sont visibles sur les deux faces du limbe, et contiennent les urédospores, formes de propagation de l'agent pathogène. La maladie touche d'abord les feuilles de la base, puis gagne les étages supérieurs.
La rouille du poireau est une maladie polycyclique, avec plusieurs cycles de développement qui s'enchainent sur une même culture. L'agent pathogène responsable est *Puccinia allii*. Les conditions optimales pour l'infection sont une température de 15 °C et une hygrométrie proche de 100 % pendant au moins quatre heures consécutives. L'agent pathogène est actif entre 5 et 24 °C, avec un optimum de développement de la maladie à 18 °C. Dans ces conditions, la durée d'incubation est de dix jours.
Les facteurs favorables au développement de la rouille sur poireau sont donc liés à une humidité stagnante et des températures douces. De plus, d'importantes différences de sensibilité variétale ont été mises en évidence sur le terrain. En parcelles, on peut rencontrer des pustules de rouille pratiquement toute l'année dans les principales régions productrices françaises.

STRATÉGIES DE PROTECTION SANITAIRE

En termes de prophylaxie, il est important de choisir des variétés peu sensibles. Il faut veiller aussi à éviter la concomitance entre les cultures d'hiver (ou des résidus de culture) porteuses d'inoculum, et la présence des cultures de printemps. Sur les variétés sensibles, il faut également s'assurer de maintenir la pépinière indemne pour ne pas introduire d'inoculum primaire dans la parcelle. Les densités de plantation et le niveau de fertilisation peuvent également influer sur le développement de la maladie mais on ne dispose pas de données chiffrées, à notre connaissance, à ce sujet.
À l'heure actuelle, six substances actives sont autorisées pour la protection des cultures de poireau contre la rouille, dont deux uniquement en association. Parmi ces six substances actives, quatre sont aussi autorisées contre le mildiou. Afin de raisonner la protection, il convient donc de prendre en compte le mode d'action des spécialités, leur spectre d'efficacité, le nombre d'application maximum par an, et les délais avant récolte. Il est aussi indispensable d'alterner les substances actives, pour éviter d'une part l'apparition de résistances, et d'autre part l'accumulation de résidus.
De fait, le choix de la conduite à mener est stratégique, notamment pour les cultures exposées aux deux maladies, rouille et mildiou, sur des périodes longues (culture pouvant s'étaler entre juillet et mars, soit neuf mois).
Dans ce contexte, mais aussi dans le cadre plus large de la réduction de l'utilisation des pesticides, il est essentiel d'appliquer les traitements phytosanitaires au meilleur moment possible, afin d'optimiser au mieux chaque application.

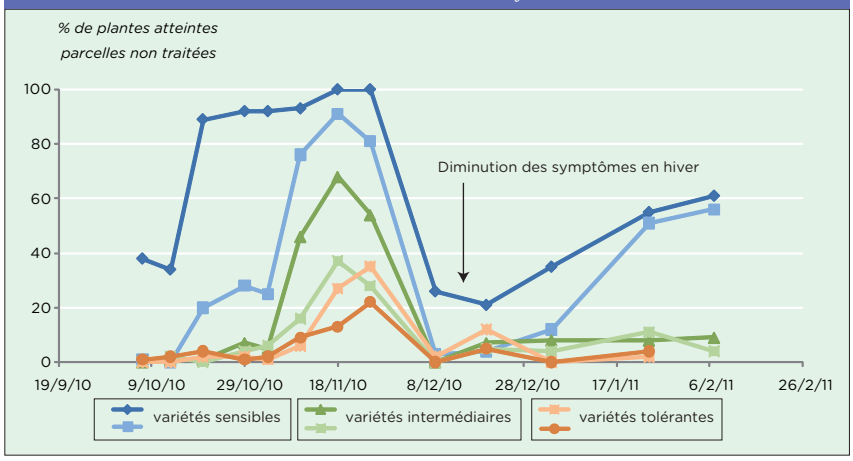
FIGURE 1
Schéma de fonctionnement du modèle
Source : Ctifl



MODÈLE ET CONSTRUCTION

Le travail sur la prévision des risques liés à la rouille du poireau a démarré en 2003, en collaboration entre le Ctifl et le Sileban. La Fredon Nord – Pas-de-Calais a rejoint le partenariat en 2005.
La conception de ce modèle est basée sur des données bibliographiques et expérimentales.
Chaque étape de la biologie du champignon et de son interaction avec la plante est prise en compte dans le modèle, qui considère la succession des générations sur le temps de la culture. Les événements majeurs sont la contamination, à savoir la pénétration d'une spore de rouille dans une feuille de poireau, et l'apparition de taches, c'est-à-dire que le développement de cette spore a abouti à la formation d'une nouvelle pustule, remplie de spores.
Les quatre étapes importantes, qui correspondent à quatre « compartiments » du modèle sont :
- la détermination de périodes favorables à la dissémination et aux contaminations ;
- la réalisation de ces contaminations ;
- la progression de l'inoculum au cours de la saison ;
- et la latence entre une contamination et la sortie de tache correspondante.
En terme de sorties du modèle, chaque jour plusieurs informations sont disponibles : y a-t-il ou non une contamination possible ? Y a-t-il ou non une sortie de tache prévue ? En outre, le modèle informe du nombre de jours estimé avant la prochaine sortie de tache, d'une part de la génération en cours et, d'autre part, de la génération suivante. Ce nombre de jours est estimé par régression linéaire sur les sept derniers jours.
À noter :
- pour une même génération, il ne peut pas y avoir en même temps des contaminations et des sorties de taches ;
- pour un cycle complet/une génération, le nombre de contaminations est égal au nombre de sorties de taches (mais deux sorties de taches peuvent avoir lieu le même jour) ;
- toute contamination ayant lieu après la 1re sortie de tache d'une génération est considérée comme appartenant à la génération suivante.

FIGURE 2
Évolution de la proportion de plantes présentant des symptômes de rouille (taches sporulantes), dans des parcelles non traitées - *Source : Ctifl*



LES COMPARTIMENTS DU MODÈLE

Dans le modèle, une période favorable à la dissémination des spores et à la contamination d'une feuille de poireau est définie par une durée minimale de deux heures avec une humidité relative comprise entre 93 et 100 %, et une pluviométrie horaire inférieure à 1 mm. Une journée correspond à 24 heures sur la période de midi à midi, afin de ne pas « couper » la nuit, où ces périodes favorables sont susceptibles d'avoir lieu.
Pour la contamination, plusieurs sources de données ont été utilisées. Les travaux de Gilles et Kennedy (2003) présentent des informations sur les conditions de germination des spores de *P. allii*. Ceux de Magarey (Magarey *et al.*, 2005) fournissent la clé d'un modèle prédictif simple. Enfin, des données expérimentales acquises par la Fredon permettent de remanier les équations de base afin de correspondre à la biologie de *P. allii*. Au final, le modèle prend en compte une équation polynomiale de degré 2 sur la relation entre la température (moyenne pendant la durée d'humectation) et la durée d'humectation nécessaire pour avoir une contamination.
Le modèle travaille avec une progression de l'inoculum au cours de la culture. À partir d'un niveau de départ fixé à 2 spores/cm² de feuille, l'inoculum augmente de façon géométrique à chaque cycle.
La latence, enfin, est considérée comme la durée entre la contamination et le moment où le taux de production de taches est le plus haut, soit la date où 37 % des taches correspondant à une contamination sont sorties. Pour cette étape, les données proviennent des travaux de Gilles et Kennedy (2003). Le modèle prend ainsi en compte une équation sur la relation entre la température (moyenne pendant la période de latence) et le nombre de jours entre la contamination et la date où 37 % des taches sont sorties. Cette équation tient compte du taux d'inoculum.

LES DONNÉES NÉCESSAIRES

Au final, afin de délivrer une information sur la prévision des risques liés à la rouille sur poireau, le modèle n'a besoin que de trois types de données, uniquement météorologiques : la température moyenne, l'humidité relative moyenne, et la pluviométrie, toutes trois au pas de temps horaire. La seule autre donnée d'entrée est la date de plantation de la parcelle en poireau, qui marque la date de démarrage du modèle. Il n'y a pas de prise en compte d'éventuelles formes hivernantes, et donc des conditions précédant l'implantation de la culture, ni des parcelles environnantes qui pourraient être contaminantes. Il est conseillé de

CÉLINE JANVIER, JÉRÔME VIBERT,
CTIFL

disposer des données d'une station météorologique aussi proche que possible de la parcelle suivie.

ESSAIS DE VALIDATION ET INFORMATIONS IMPORTANTES

Des essais de validation du modèle et de de stratégies de protection utilisant le modèle ont été mis en place depuis 2005 par les partenaires. Pour la validation, de nombreux suivis épidémiologiques dans des parcelles non traitées ont été réalisés. Les informations recueillies ont été confrontées aux équations et aux sorties du modèle, ce qui a permis d'en affiner les paramètres (annulation des contaminations en cas de pluie, températures limites...).

Les stratégies testées se basaient sur les différents événements prévus par le modèle : contaminations et sorties de taches, avec ou sans changement de génération. Les stratégies utilisaient des produits phytosanitaires homologués, avec respect des DAR et du nombre maximum d'application. Des témoins non traités permettaient de suivre l'évolution de la maladie, en lien avec les prévisions du modèle.

Globalement, il ressort plusieurs constats de ces essais. En général, les augmentations de symptômes sur le terrain sont en lien avec les changements de génération des sorties de taches. Ainsi, chaque démarrage de cycle peut s'accompagner d'une progression rapide des symptômes. Il est donc important de cibler les applications de spécialités phytosanitaires à ces périodes. Les sorties de taches sont les événements à cibler, plus que les contaminations.

La sensibilité variétale a un rôle prédominant. Les variétés dites tolérantes, sur le terrain, peuvent ne présenter quasiment aucun symptôme malgré l'enchainement des cycles de rouille, même sur les témoins non traités. Dans ce cas de figure, il serait inutile de traiter les parcelles, même si le modèle prévoit un risque. Celui-ci sera alors plutôt utilisé pour contrôler l'état sanitaire des cultures lors des périodes à risque de sortie de taches et intervenir en cas de symptômes le cas échéant. Au contraire, sur des variétés dites sensibles, les épidémies peuvent rapidement devenir ingérables, avec la quasi-totalité des plantes touchées. Dans ce cas, il est primordial d'intervenir suffisamment tôt. Les essais ont démontré que sur certaines variétés hyper-sensibles l'épidémie était quasiment incontrôlable lors de périodes particulièrement propices au champignon.

> IL EST NÉCESSAIRE DE DISPOSER DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES POUR FAIRE FONCTIONNER LE MODÈLE

Ces essais ont aussi permis de faire évoluer l'interface informatique du modèle, notamment par une simplification des sorties graphiques, afin de faciliter l'utilisation de l'outil et l'interprétation des sorties.

L'INDICE DE RISQUE

Ces constatations, suite aux essais mis en place, ainsi que la volonté de rendre les sorties du modèle facilement lisibles, ont conduit à la définition d'un indice de risque, en lien avec la sensibilité de la variété de poireau et les sorties du modèle.

Ainsi, pour une variété reconnue comme sensible, on considère que toute sortie de tache est « à risque », et l'indice de risque varie de la façon suivante :

- dès qu'une contamination est prévue par le modèle, le risque est faible (jaune, 1) ;
- deux jours avant une sortie de tache prévue, le risque est fort (rouge, 3) ;
- en cas d'application d'un traitement, le risque est faible durant toute la durée de rémanence (attribuée par l'utilisateur du modèle). Il repasse ensuite en risque moyen (orange, 2) dès qu'une sortie de tache est prévue, et en risque fort deux jours avant la sortie de tache prévue.

Même si les symptômes ne sont pas détectés sur le terrain, il faut prendre en compte les prévisions du modèle, pour ne pas laisser l'épidémie se développer.

Pour une variété reconnue comme intermédiaire, ce sont les changements de générations qui sont considérés comme « à risque », et l'indice varie de la façon suivante :

- dès qu'une sortie de tache est prévue, le risque est faible ;
- à partir du moment où les premiers symptômes de pustules de rouille sont détectés sur le terrain, le risque est moyen ;
- à partir de cette première observation, deux jours avant une sortie de tache d'une nouvelle génération prévue, le risque est fort ;
- en cas d'application d'un traitement, le risque est faible durant toute la durée de rémanence (attribuée par l'utilisateur du modèle). Il repasse ensuite en risque moyen dès qu'une contamination de la génération suivante est prévue, et en risque fort deux jours avant la sortie de tache de nouvelle génération prévue.

Enfin, pour une variété reconnue comme tolérante, il ne serait pas correct de mettre un risque, moyen ou fort, si sur le terrain il n'y a pas de pression de la maladie. Dans ce cas, l'indice de

risque varie de la façon suivante :
- à partir du moment où les premiers symptômes de pustules de rouille sont détectés sur le terrain, le risque est faible ;
- à partir de cette première observation, deux jours avant une sortie de tache d'une nouvelle génération prévue, le risque est à évaluer sur le terrain (bleu, 4) ;
- en cas d'application d'un traitement, le risque est faible durant toute la durée de rémanence (attribuée par l'utilisateur du modèle). Il repasse ensuite en risque à évaluer deux jours avant une sortie de tache de nouvelle génération prévue.

Il est très important de rappeler que le modèle de prévision des risques est un outil, parmi d'autres, d'aide à la décision. L'observation et le suivi des parcelles restent primordiaux pour décider d'interventions sur le terrain.

L'UTILISATION DU MODÈLE EN PRATIQUE

Le modèle, une fois en exploitation, sera accessible à tous les types d'utilisateurs : producteurs, techniciens, conseillers, responsables de la surveillance biologique du territoire… Il sera accessible via Inoki® (www.fruits-et-legumes.net/Inoki), la plate-forme web de diffusion de modèles du Ctifl, par abonnement.

Dans l'interface du modèle, chaque utilisateur pourra créer son parcellaire, avec pour chaque parcelle une date de plantation, une sensibilité « estimée » de la variété plantée, et une station météorologique, dont les données seront utilisées. Le modèle peut tourner automatiquement avec des données issues de la base de données climatiques Celsius, si la station correspondante y est intégrée (et sous réserve de disposer du droit d'utilisation de ces données). Il est aussi possible de faire fonctionner le modèle en important des données météorologiques « extérieures » à celles compilées dans Celsius.

C'est aussi l'utilisateur qui pour chaque parcelle devra renseigner, si elle est disponible, la date à laquelle les premiers symptômes ont été observés sur le terrain, et les dates d'intervention pour application d'une spécialité phytosanitaire fongicide. Il n'est pas nécessaire de préciser la spécialité appliquée, par contre, l'utilisateur doit renseigner sa durée de rémanence estimée.

Lorsque l'utilisateur se connectera, avec son identifiant et son code personnels, il arrivera ensuite directement sur une page de synthèse lui présentant, pour chaque parcelle, et pour le jour de connexion :
- le nombre de jours prévu avant la prochaine sortie de tache attendue dans la génération en cours, cette sortie étant identifiée par son n° de génération et son « ordre de sortie » dans cette génération (ainsi, G6-3 est la 3e sortie de tache de la 6e génération) ;
-le nombre de jours avant la première sortie de tache de la génération suivante.

Les prévisions ne sont affichées qu'à partir du moment où il reste moins de dix jours avant l'événement prévu. Sur le tableau sont aussi indiqués la date de fin de rémanence du dernier traitement phytosanitaire, le niveau de risque (chiffre de 1 à 4 et/ou code couleur jaune/orange/rouge/bleu), et la date du dernier calcul ayant fourni ces informations.

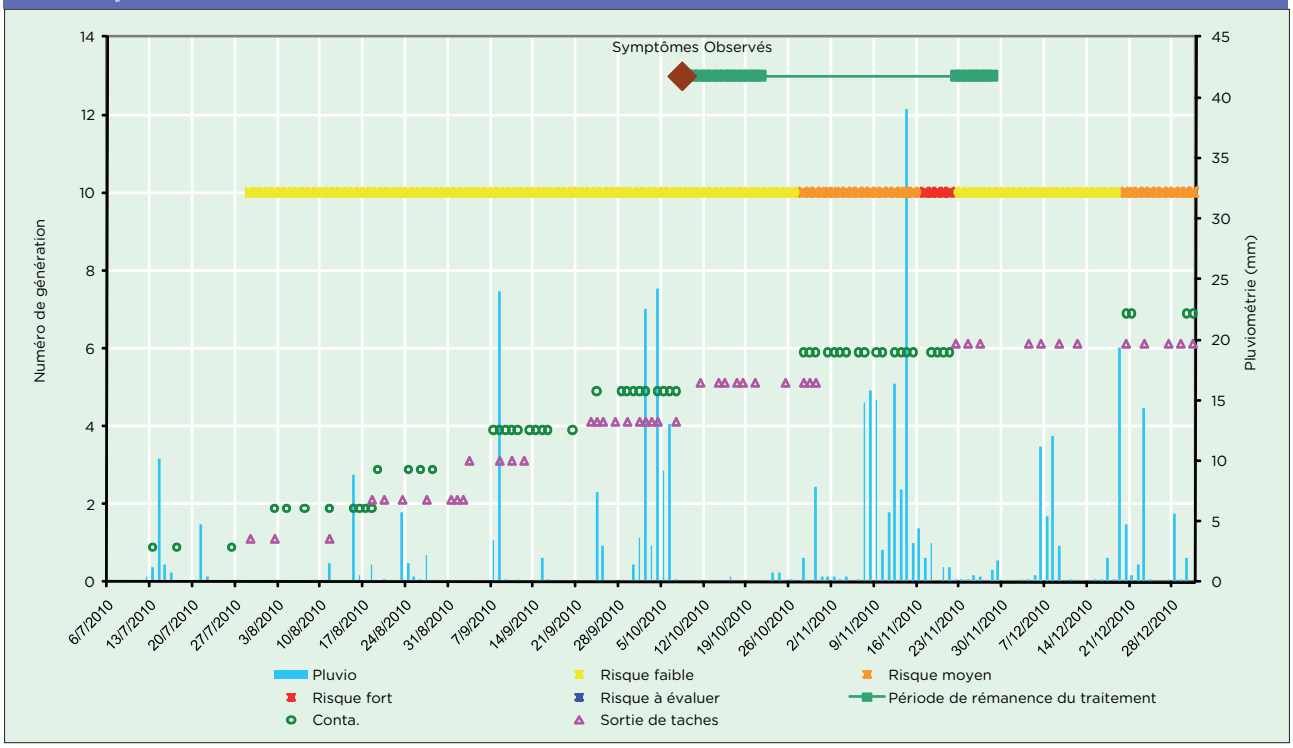
En outre, pour chaque parcelle, l'utilisateur saura si tous les paramètres obligatoires ont bien été renseignés, et il pourra accéder à une page lui permettant de modifier ces paramètres, ou de les compléter si certains font défaut.

Pour ce qui concerne les données météo, une signalétique permettra à l'utilisateur de savoir si les données sont complètes et sans erreurs. Dans ce cas, le modèle peut lancer une simulation. Dans le cas de données obligatoires manquantes, cela sera signalé, et l'utilisateur pourra accéder à une page lui indiquant quelles sont ces données. Il pourra alors les corriger. Cette correction ne sera valable

> ÉCRAN : TABLEAU DE RÉSULTATS MULTIPARCELLES

CÉLINE JANVIER, JÉRÔME VIBERT,
CTIFL

FIGURE 3
Sortie graphique du modèle, exemple d'une variété intermédiaire. Seule une période de 6 mois, de juillet à décembre, est présentée
Source : Ctifl



que pour la parcelle concernée. Jusqu'à la correction directe dans Celsius par l'utilisateur, une signalétique spécifique informera l'utilisateur que des données ont été corrigées « localement » pour la parcelle.
Le modèle tourne « automatiquement » deux fois par jour. L'utilisateur a aussi la possibilité de rafraichir une simulation. Enfin, il est possible, à partir de ce tableau de synthèse, d'accéder aux données détaillées pour chaque parcelle.
Dans le tableau détaillé, l'utilisateur retrouve, pour chaque jour depuis la date de plantation, et jusqu'à la dernière simulation :
- des données météorologiques : température moyenne et pluviométrie ;
- l'information d'une contamination ou non ;
- l'avancement de la latence avant la prochaine sortie de tache, et la correspondance en nombre de jours ;
- la même chose pour la 1re sortie de tache de la génération suivante ;
- la valeur de l'indice de risque.

UN PROJET EN COURS

L'Acta anime le RMT Modélisation (www.modelia.org), réseau modélisation et logiciels d'intérêt commun appliqués à l'agriculture. Dans le cadre de ce RMT, l'Acta est porteur d'un projet (2010-2012) intitulé « Associer un niveau d'erreur aux prédictions des modèles mathématiques pour l'agronomie et l'élevage ».
L'objectif principal est de définir une démarche permettant d'associer un niveau d'erreur aux modèles de système utilisés en agronomie. Dix cas d'étude ont été choisis pour représenter la diversité des cas d'utilisation des modèles de système avec des utilisations pour la prédiction, pour l'aide à la décision ou encore pour le diagnostic. Pour ce qui concerne le cas d'étude du Ctifl, le travail porte sur le modèle de prévision des risques liés à la rouille sur poireau. Ainsi, ce projet va permettre de travailler sur la conséquence sur les sorties du modèle d'une incertitude sur les données météo, sur la pertinence d'utiliser les données d'une station météo plus ou moins éloignée de la parcelle suivie… À terme, il est possible d'envisager que les prévisions seront données avec un intervalle de confiance.

PRÉ-LANCEMENT, ET APRÈS

Le modèle de prévision des risques liés aux épidémies de rouille en culture de poireau a été mis au point et travaillé depuis 2003. Il rentre en 2011 en phase de pré-lancement et est accessible à tous les utilisateurs potentiels, désireux de le mettre en situation dans leur région et de faire des retours sur son ergonomie. Ce modèle sera ensuite en exploitation commerciale à partir de 2012.
Ce modèle est un outil d'aide à la décision pour le raisonnement des stratégies de protection sanitaire des cultures de poireau, qui ne dispense pas des observations au champ mais qui contribue à positionner au mieux les traitements destinés à maitriser les épidémies de rouille en parcelle. ■