

Un modèle de simulation au service des producteurs de plants de pommes de terre

T. NEMECEK, J. O. DERRON et R. SCHWÄRZEL, Station fédérale de recherches agronomiques de Changins, CH-1260 Nyon
A. FISCHLIN, Ecologie des systèmes, Institut d'écologie terrestre, Ecole polytechnique fédérale de Zurich, CH-8952 Schlieren
O. ROTH, Widenstrasse 3, CH-8302 Kloten

Introduction

L'agroécosystème des virus transmis par les pucerons dans les pommes de terre comprend comme principaux éléments: les plantes, les pucerons et les virus. Ces éléments, interactifs, sont en outre influencés par l'environnement naturel (par exemple la météorologie) et par les interventions de l'homme. Le grand nombre d'éléments et d'interactions fait que ce système est très complexe (PETERS, 1987). Des réactions, parfois imprévisibles, ont surpris plus d'un expert au cours des trente dernières années et ont eu des conséquences économiques graves (HÄNI et WINIGER, 1987). Pourtant, de nombreuses relations dans ce système sont connues. On a étudié la relation entre les vecteurs et les virus (DE BOKX et PIRON, 1990; DERRON et GOY, 1990), celle entre les virus et la plante (SIGVALD, 1985; BEEMSTER, 1987; GIBSON, 1991) et celle entre la plante et les pucerons (KLINGAUF, 1987; IRWIN et KAMPMEIER, 1989). Cependant, étant donné la complexité du système, il est difficile de faire une synthèse de toutes ces informations et de les utiliser pour la prévision avec les moyens usuels. Par conséquent, le recours à des techniques de traitement de l'information mieux adaptées s'impose. Les techniques de modélisation et de simulation sur ordinateur qui ont été développées au cours des deux dernières décennies se prêtent à la résolution de tels problèmes (DENT et BLACKIE, 1979; DERRON, 1989). Un modèle de simulation permet d'évaluer en

Résumé

EPOVIR est un modèle épidémiologique des viroses de la pomme de terre couplé avec un modèle de la croissance des plantes et un modèle du bilan hydrique du sol. Son application pratique offre de nouvelles perspectives pour la production de plants de pommes de terre. Le modèle calcule les taux d'infection des tubercules par le virus Y et par le virus de l'enroulement, ainsi que le rendement et le calibre. Il peut être utilisé pour faire des prévisions d'infections virales et de rendement. Il permet de déterminer les dates de défanage optimales et d'évaluer l'impact des mesures culturales. Il peut également être utilisé pour la formation des producteurs et des experts. Ces applications potentielles sont décrites avec des exemples. Le modèle est actuellement intégré dans un système d'aide à la décision appelé «TuberPro».

quelques secondes une masse énorme d'informations, de faire des «essais» sur l'ordinateur qui auraient exigé des années de travail au champ, et même, d'exécuter des «essais» irréalisables au champ. Un modèle ne remplace naturellement pas l'expérimentation au champ et au laboratoire, mais il la complète.

Description du modèle EPOVIR

Pour obtenir les données nécessaires au fonctionnement d'un modèle, il a fallu développer d'abord des méthodes d'échantillonnage, de piégeage des pucerons (DERRON *et al.*, 1989) et de détection des virus (GUGERLI, 1979) et faire de nombreux essais pour déterminer les valeurs des paramètres. De plus, des essais ont été effectués pour la validation du modèle (comparaison des ré-

sultats fournis par le modèle avec les résultats des essais). Ces recherches, commencées en 1983 à la Station fédérale de recherches agronomiques de Changins, ont été étendues dès 1991 à des régions de production de plants de pommes de terre.

La modélisation a été effectuée principalement à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich au sein du groupe «Ecologie des systèmes» et a fait l'objet d'une thèse de doctorat (NEMECEK, 1993). Le modèle EPOVIR (= épidémies des virus de la pomme de terre) est composé de sous-modèles existants et de sous-modèles inédits. Il est programmé en Modula-2 et utilise l'environnement de simulation «Model-Works» (FISCHLIN *et al.*, 1990). Ce modèle a ensuite été simplifié et adapté aux conditions de la pratique.

Le modèle est composé de quatre sous-modèles (fig. 1):

– le sous-modèle «inoculations» cal-

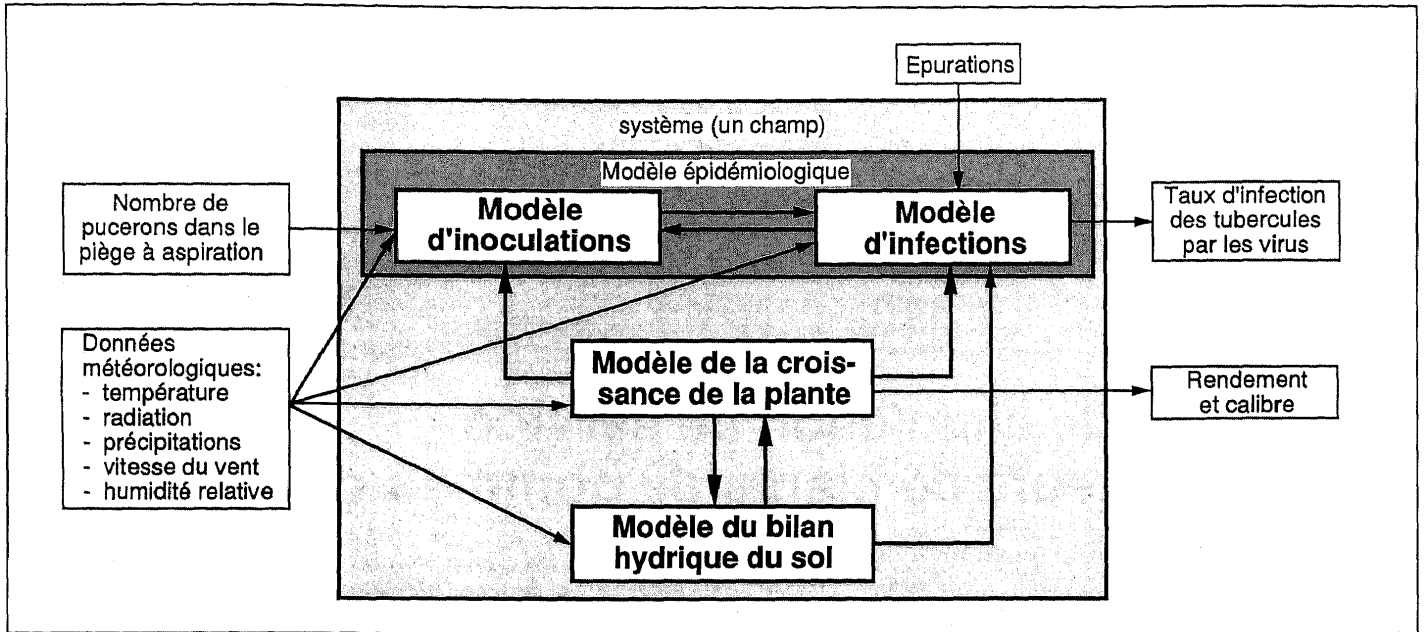


Fig. 1. Structure du modèle EPOVIR (épidémies des virus de la pomme de terre).

culé le nombre de vecteurs par plante (basé sur les captures du piège à aspiration) et le nombre de transmissions de virus. Le sous-modèle prend en considération l'efficacité de transmission des différentes espèces de pucerons et leur comportement;

- le sous-modèle «infections» simule le nombre d'infections effectuées et calcule les taux d'infection par les virus Y (PVY) et de l'enroulement (PLRV) des plantes et des tuber-

cules, en tenant compte de la période de latence et de la résistance d'âge des plantes;

- le sous-modèle «croissance de la plante» calcule l'évolution de la masse des feuilles, des tiges, des racines et des tubercules, l'âge physiologique des plantes, ainsi que le calibre des tubercules. La réduction de croissance due aux virus est négligée. Le modèle n'est donc valable que si des plants peu contaminés sont utilisés;

- le sous-modèle «bilan hydrique du sol» simule la quantité d'eau dans le sol et le stress hydrique subi par les plantes.

Le modèle EPOVIR utilise le nombre de vecteurs pris par jour dans le piège à aspiration de Changins et les valeurs météorologiques journalières (fig. 1). En outre, le modèle a besoin de données telles que le type de sol, la date de levée, le taux de virose du lot de départ, la variété, etc. qui caractérisent la parcelle et la culture.

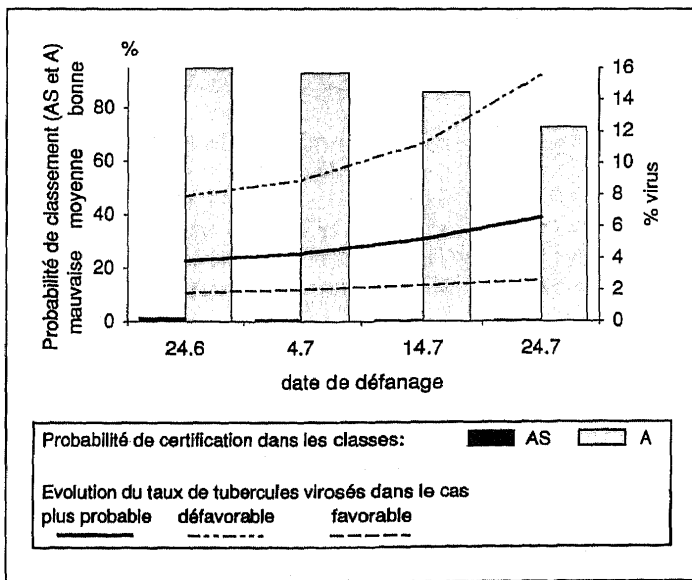


Fig. 2. Prévision (simulation) du taux de tubercules virosés et de la probabilité de classement dans les classes AS et A d'une culture de Bintje*. On voit que la culture a une bonne chance d'être certifiée en classe A (maximum 10% de tubercules virosés), mais que la production en classe AS (maximum 2% de tubercules virosés dont 1% de PVY) est par contre pratiquement exclue.

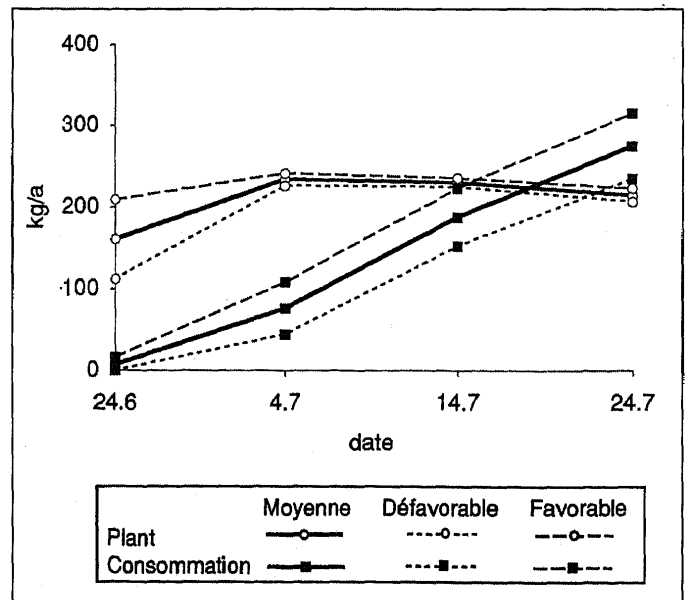


Fig. 3. Prévision (simulation) du rendement d'un champ de Bintje dans les calibres «plant» (32-45 mm) et «consommation» (45-70 mm) pour l'évolution la plus probable (moyenne), défavorable et favorable. On voit que dans ce cas le rendement maximal dans le calibre «plant» est atteint au début de juillet.

* Dans les figures 2 et 3, les données de l'année 1993 (météorologie et piège à aspiration) ont été utilisées jusqu'au 14.6. (date de prévision le 15.6.), ensuite les valeurs des dix dernières années ont été utilisées.

Applications pratiques du modèle

Le modèle peut être utilisé pour les prévisions du taux de virose et du rendement, pour l'évaluation des mesures culturales et pour la formation des producteurs ou des experts. Les applications pour la recherche (DERRON, 1987) ne sont pas discutées ici.

Prévisions

Un des buts principaux du projet est d'optimiser la date de défanage par une prévision des viroses et du rendement. Cette date est très critique, puisque le défanage intervient à un moment où le taux de virose et le rendement peuvent augmenter très rapidement (SCHWÄRZEL et GEHRIGER, 1989).

Les valeurs futures des données météorologiques et celles qui concernent les vecteurs sont inconnues et doivent par conséquent être remplacées par des valeurs calculées sur la base des données des années antérieures. L'imprécision ainsi créée augmente encore lorsqu'on tient compte de l'erreur d'estimation des paramètres. Les figures 2 et 3 expriment le degré d'incertitude de la prévision. Le taux de virose et le rendement effectifs devraient se retrouver avec une probabilité de 80% entre la prévision pour le cas «favorable» et celle pour le cas «défavorable» («favorable» et «défavorable» du point de vue du producteur). Pour le producteur, il est encore plus important de connaître le risque de déclassement d'une culture. Ce risque est également calculé (fig. 2).

Le modèle peut aussi servir après le défanage à déterminer les lots qui courent

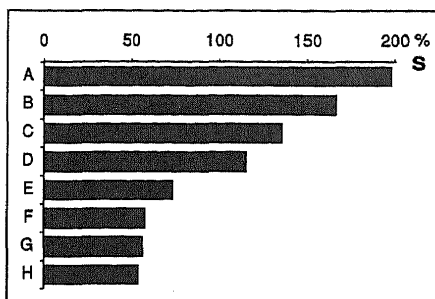


Fig. 4. Analyse de sensibilité du modèle EPOVIR. S = sensibilité * du taux de tubercules infectés par PVY à la récolte aux changements des paramètres suivants: A = seuil de température pour le vol des pucerons, B = résistance d'âge des plantes aux infections par les virus, C = efficacité de transmission du PVY par les vecteurs, D = taux d'immigration des vecteurs dans le champ, E = déviation standard de la période de latence, F = période de latence moyenne, G = % de PVY dans le lot de départ, H = probabilité d'émigration des vecteurs du champ.

* Dans la figure 4, la sensibilité S est définie comme le taux de changement relatif de l'infection des tubercules par PVY en fonction du changement d'un paramètre: si un paramètre change de X %, l'infection des tubercules change de $X \times S / 100$ %.

un risque d'être déclassés et à ne tester que ceux-ci. Cette manière de faire permettrait de réaliser d'importantes économies (SCHWÄRZEL et GEHRIGER, 1989).

Evaluation des mesures culturales

Pour lutter contre les maladies à virus, il faut connaître les facteurs qui déterminent l'épidémie. L'outil qui permet de faire cela, lorsque le modèle est bien validé, est l'analyse de sensibilité. Dans cette analyse, les paramètres sont

changés un à un et la réaction du modèle (taux de tubercules virosés) est observée. Les paramètres qui ont la plus grande influence sur le taux d'infection offrent aussi le plus grand potentiel d'intervention, pour autant qu'ils puissent pratiquement être changés.

L'analyse de sensibilité du modèle EPOVIR (NEMECEK, 1993) fait ressortir huit paramètres importants (fig. 4) et montre que les mesures suivantes sont parmi celles qui peuvent réduire le taux d'infection par le PVY:

- sélection de régions défavorables au vol des pucerons (régions fraîches et ventilées);
- application d'huile minérale (réduction de l'efficacité de transmission);
- plantation précoce de plants prégermés (développement précoce de la résistance d'âge, avant le vol massif des pucerons vecteurs);
- sélection de bons lots de départ (peu infectés par les virus);
- réduction du taux d'immigration des pucerons ailés dans le champ, en couvrant par exemple la culture avec un voile de protection ou en camouflant la plante-hôte (intercultures, matières réfléchissantes).

Formation

L'effet des mesures culturales sur le système peut être montré de manière claire et instructive dans les cours de formation des producteurs et des experts. Les figures 5 et 6 donnent deux exemples.

Le taux d'infection est réduit si la date de levée est avancée de dix jours (figure 5, courbes A et B). Lorsque la culture arrive plus tôt au stade idéal pour

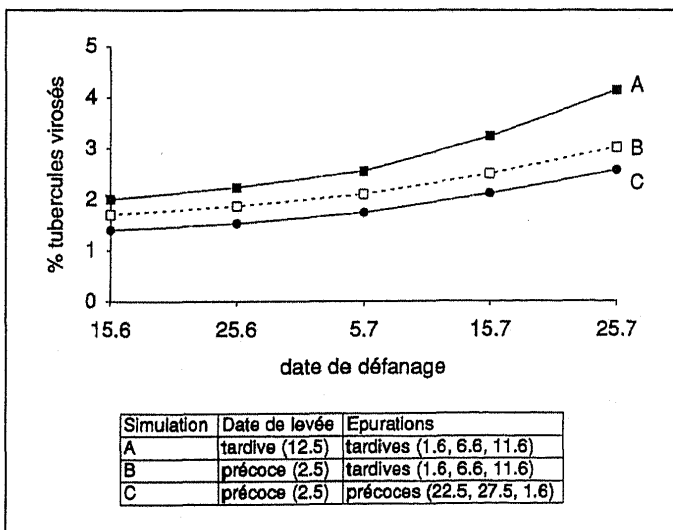


Fig. 5. Simulation de l'effet de la date de levée et des dates d'épuration sur l'évolution du taux d'infection des tubercules d'une culture de Bintje par PVY et PLRV.

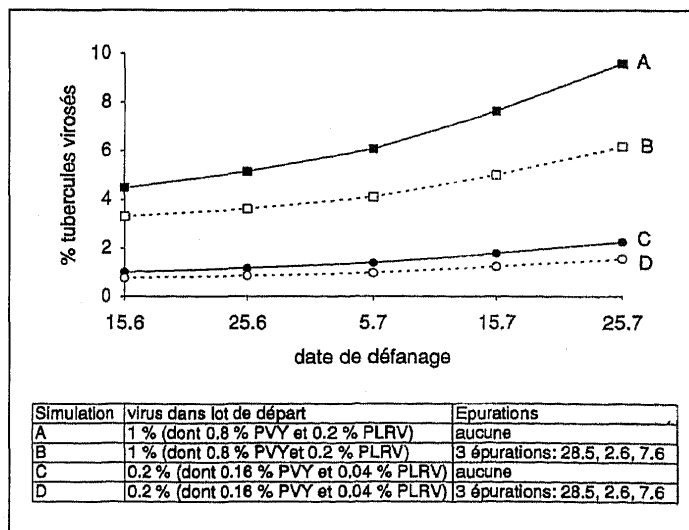


Fig. 6. Simulation de l'effet du lot de départ et de l'épuration sur l'évolution du taux d'infection des tubercules d'une culture de Bintje par PVY et PLRV.

l'épuration, on peut avancer cette opération d'autant et le résultat est encore meilleur (courbe C). Cet exemple illustre l'importance d'une bonne prégermination et d'une plantation précoce.

La figure 6 montre qu'un bon lot de départ va fournir, même sans épuration, une récolte de meilleure qualité qu'un mauvais lot épuré. L'épuration peut donc freiner, mais pas éviter la dissémination des virus. Les figures 5 et 6 indiquent également que beaucoup d'infections se produisent très tôt dans la saison. Cela signifie qu'une mauvaise situation de départ ne peut pas être totalement corrigée avec l'épuration ou la date de défanage.

Perspectives

Les sous-modèles de la croissance des plantes et du bilan hydrique du sol sont indépendants du modèle d'épidémie (fig. 1) et peuvent être utilisés pour calculer le rendement uniquement. On peut ainsi faire des prévisions similaires à celles de la figure 3 pour les pommes de terre de consommation et à usage industriel.

Comme le modèle est composé de sous-modèles qui peuvent être facilement couplés ou échangés, il serait possible d'ajouter des sous-modèles pour d'autres maladies, comme par exemple le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans* de Bary). Le modèle EPOVIR a été comparé avec des résultats d'essais (validation). Il s'est révélé capable de reproduire l'évolution du taux de virose et du rendement d'un champ. Les travaux de validation et d'adaptation, actuellement en cours à la Station de Changins, devraient aboutir à un système d'aide à la décision et de prévision appelé «TuberPro» (de *Solanum tuberosum* et **pro**gnostic), opérationnel à partir de 1994.

Remerciements

Nous remercions la Régie fédérale des alcools et le Fonds national suisse de la recherche scientifique (projet n° 31-8766.86) pour leur soutien financier.

Bibliographie

BEEMSTER A. B. R., 1987. Virus translocation and mature plant resistance in potato plants. In: De Bokx J. A. and van der Want J. P. H. (eds.): Viruses of potatoes and seed-potato production. 2^e éd., 116-125.

- DE BOKX J. A. and PIRON P. G. M., 1990. Relative efficiency of a number of aphid species in the transmission of potato virus Y^N in the Netherlands. *Neth. J. Pl. Path.* 96, 237-246.
- DENT J. B. and BLACKIE M. J., 1979. Systems simulation in agriculture. Applied Science Publishers, London, 180 p.
- DERRON J. O., 1987. Utilité des modèles mathématiques dans la recherche agronomique. *Revue suisse Agric.* 19, 233-236.
- DERRON J. O., 1989. EDV als Entscheidungshilfe im praktischen Pflanzenschutz. *Landwirtschaft Schweiz* 2, 33-36.
- DERRON J. O., GOY G. et GENTHON M., 1989. Le piégeage des pucerons ailés: potentialités et limites de différents types de pièges. In: Cavalloro R. (ed.), Euraphid network: trapping and aphid prognosis, Proc. of a meeting of the EC-Experts' group, Catania, Italy, November, 7-9, 1988, ECSC-BEC-EAEC, Brussels, Luxembourg, 71-82.
- DERRON J. O. et GOY G., 1990. Importance relative des pucerons ailés les plus fréquemment rencontrés sur la pomme de terre comme vecteurs de virus Y (PVY^N), compte tenu de leur mobilité. *Revue suisse Agric.* 22, 277-281.
- FISCHLIN A., ROTH O., GYALISTRAS D., ULRICH M. and NEMECEK T., 1990. ModelWorks: An interactive simulation environment for personal computers and work stations. Internal Report No. 8, Systems Ecology Group, ETH Zürich, 186 p.
- GIBSON R. W., 1991. The development of mature-plant resistance in four potato cultivars against aphid-inoculated potato virus Y^o and Y^N in four potato cultivars. *Pot. Res.* 34, 205-210.
- GUGERLI P., 1979. Le test immuno-enzymatique (ELISA) et son application pour le diagnostic rapide des viroses de la pomme de terre. *Revue suisse Agric.* 11, 253-260.
- HÄNI A. und WINIGER F. A., 1987. Wie produziert die Schweiz Pflanzkartoffeln ohne Blattlausbehandlung? *Kartoffelbau* 38, 273-276.
- IRWIN M. E. and KAMPMEIER G. E., 1989. Vector behaviour, environmental stimuli and the dynamics of plant virus epidemics. In: Jeger M. J. (ed.), Spatial components of plant disease epidemics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 14-39.
- KLINGAUF F. A., 1987. Host plant finding and acceptance. In: Minks A. K. and Harrewijn P. (eds.), Aphids - their biology, natural enemies and control, Elsevier, Amsterdam, a.o., 209-223.
- NEMECEK T., 1993. The role of aphid behaviour in the epidemiology of potato virus Y: a simulation study. Thèse n° 10086, EPF Zurich, 232 p.
- PETERS D., 1987. Spread of viruses in potato crops. In: De Bokx J. A. and van der Want J. P. H. (eds.), Viruses of potatoes and seed-potato production. 2^e éd., 126-145.
- SCHWÄRZEL R. et GEHRIGER W., 1989. La certification des plants de pommes de terre. *Revue suisse Agric.* 21, 67-69.
- SIGVALD R., 1985. Mature-plant resistance of potato plants against potato virus Y^o (PVY^o). *Pot. Res.* 28, 135-143.

Zusammenfassung

Ein Simulationsmodell im Dienste der Saatkartoffelproduzenten

EPOVIR ist ein epidemiologisches Modell für Kartoffelviren, welches mit einem Pflanzenwachstums- und einem Boden-Wasserbilanzmodell gekoppelt ist. Seine Anwendung eröffnet neue Perspektiven für den Anbau von Kartoffeln, insbesondere von Saatkartoffeln. Das Modell berechnet den Befall der Knollen durch das Kartoffelvirus Y (PVY) und das Blattrollvirus (PLRV), sowie den Ertrag und die Knollengrößenverteilung. Es kann benützt werden, um den Virusbefall und den Ertrag vorherzusagen, sowie eine Risikoabschätzung durchzuführen. Dies ermöglicht Frühertermine festzulegen, welche Knollenertrag und -qualität optimieren. Ferner kann das Modell dazu dienen, die Nützlichkeit von Bewirtschaftungs- und Bekämpfungsmassnahmen abzuklären und um Experten und Produzenten auszubilden. Diese potentiellen Anwendungen werden anhand von Beispielen diskutiert. Gegenwärtig wird das Modell in ein entscheidungsunterstützendes System namens «TuberPro» (*Solanum tuberosum* Prognose) integriert.

Summary

A simulation model useful for seed potato growers

EPOVIR is an epidemiological model for potato viruses coupled with a plant growth and a soil water balance model. Its practical application offers new perspectives for the production of potatoes, especially of seed potatoes. The model calculates the fraction of tubers infected by potato virus Y (PVY) and potato leaf roll virus (PLRV) as well as the yield and the tuber size distribution. It can be used to forecast the virus infection and the yield, and to perform a risk assessment. This allows to choose haulm-killing dates that optimize tuber yield and quality. Further the model can serve to evaluate the usefulness of cultural and virus control measures and for the instruction of experts and growers. These potential applications are discussed with examples. The model is now being integrated in a decision-support system called "TuberPro" (*Solanum tuberosum* prognosis).