

Végéphy – 12^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 11 ET 12 DÉCEMBRE 2018

**SIMMAT DIAPORTHE : UN MODELE POUR PREDIRE LA DYNAMIQUE DE MATURATION DES
PERITHECES DE DIAPORTHE HELIANTHI**

M.-A. VEDY-ZECCHINI^(1,2), G. QUESNEL⁽³⁾, E. MESTRIES⁽⁴⁾, M.-H. ROBIN^(1,5) ET J.-N. AUBERTOT⁽¹⁾

⁽¹⁾ Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et Agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France.

⁽²⁾ Université Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et Agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France.
jean-noel.aubertot@inra.fr

⁽³⁾ Institut National de la Recherche Agronomique, Mathématique et Informatique Appliquées de Toulouse, Unité de Recherche 875 Biométrie et Intelligence Artificielle, Castanet-Tolosan, France

⁽⁴⁾ Terres Inovia, Unité Mixte de Recherche 1248 Agrosystèmes et Agricultures, Gestion des Ressources, Innovations et Ruralités, Castanet-Tolosan, France

⁽⁵⁾ Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, France

RÉSUMÉ

Diaporthe helianthi est l'agent causal du phomopsis du tournesol. Les ascospores infectent les feuilles, qui vont générer des taches encercantes mortelles. Après récolte, le mycélium survit sur les résidus. A la fin de l'hiver, des perithèces apparaissent et vont émettre des ascospores de *D. helianthi*. Les principales méthodes de gestion sont agronomique, génétique, et chimique. Pour qu'ils soient efficaces, les traitements fongicides doivent coïncider avec la première émission significative d'ascospores. Les agriculteurs ont donc besoin d'un outil d'aide à la décision prédisant la temporalité des émissions des ascospores. Cette communication présente l'adaptation du modèle générique SimMat répondant à ce besoin.

Mots-clés : inoculum primaire, paramètres, algorithme, simulation, validation-croisée.

ABSTRACT

D. helianthi causes phomopsis stem canker. Ascospores infect sunflower leaves, which will generate killing girdling symptoms. After harvest, fungus mycelium survives on infected stubble. At the end of winter, *D. helianthi* perithecia appear and will release ascospores. Disease management relies on cultural, genetic and chemical control methods. Fungicide treatments have to be applied just before the main ascospore showers. Farmers and advisers therefore need a Decision Support System to predict these periods. This communication presents the adaptation of the generic SimMat model to *D. helianthi* to fulfill this need.

Keywords: primary inoculum, parameters, algorithm, simulation, cross-validation.

INTRODUCTION

Diaporthe helianthi (Munt.-Cvet.) est le champignon responsable de l'une des principales maladies du tournesol dans le Monde, le phomopsis (Thompson, 2011 ; Masirevic, 2016). La nuisibilité de la maladie, liée au caractère encerclant des nécroses sur tige, peut entraîner des pertes de 0,15 kg.m⁻² et 25% de la teneur en huile (Masirevic and Gulya, 1992).

Après récolte, le mycélium du champignon peut survivre dans les résidus de culture restés à la surface du sol pendant au moins 1 an. A partir de ce mycélium, *D. helianthi* effectue sa reproduction sexuée (phase téléomorphe, seule phase considérée dans cette communication) en produisant des périthèces (Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989). Cette production, initiée à l'automne (Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989), est favorisée par des températures moyennes journalières n'excédant pas 10°C et une pluviométrie permettant une humidification suffisante des résidus restés au sol (Fayret and Assémat, 1987). Lors du processus de maturation, des asques contenant 8 ascospores se développent à l'intérieur des périthèces. Un périthèce est capable d'éjecter ses ascospores lorsqu'il est mûr : ses asques sont différenciés et les ascospores bicellulaires contiennent 2 à 4 inclusions. Ces dernières sont éjectées des périthèces de mai à août à la faveur d'épisodes pluvieux ; elles sont à l'origine des infections sur feuilles courant mai juin le plus souvent (Petrov *et al.*, 1981 ; Fayret and Assémat, 1987). Les émissions d'ascospores deviennent significatives lorsque la proportion de périthèces mûrs atteint un seuil de 50% (Délos and Moinard, 1995). La période pendant laquelle les tissus du tournesol sont les plus réceptifs aux ascospores se situe entre les stades phénologiques « bouton étoilé » (E1, BBCH51) et « tout début floraison » (E5, BBCH59) (Délos and Moinard, 1995).

La lutte contre la maladie est basée sur la gestion de l'inoculum primaire (broyage et enfouissement des résidus infectés), sur de bonnes pratiques agronomiques (adaptation de la date et de la densité de semis, gestion de la fertilisation azotée ; Debaeke and Estragnat, 2003 ; Debaeke *et al.*, 2003 ; Debaeke and Moinard, 2010 ; Desanlis *et al.*, 2013) et sur le choix de variétés à bon comportement (www.terresinovia.fr). La lutte fongicide est une solution de dernier recours. Trois spécialités, associant une strobilurine à une triazole, ou un carboxamide, sont aujourd'hui autorisées en France. Leur application se raisonne au plus tard au stade limite de passage du tracteur (stade « bouton étoilé »), et doit être déclenchée selon la situation de production (zone à risque, état du couvert, comportement de la variété) et l'analyse de risque issue du Bulletin de Santé du Végétal (www.terresinovia.fr).

Pour être efficace, la protection fongicide doit être positionnée un peu avant ou au moment de la première émission d'ascospores significative. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire ces dates d'émission pour raisonner l'utilisation de fongicides.

L'analyse du risque phomopsis repose sur un modèle épidémiologique, développé au milieu des années 90 par le Service de la Protection des Végétaux de Midi-Pyrénées, ASPHODEL (Délos and Moinard 1997). Ce modèle, déterministe et dynamique, décrit notamment l'effet du climat sur le cycle du champignon : la maturation des périthèces, la projection des ascospores et les contaminations. Ses variables de sortie journalières sont binaires : jour avec émission d'ascospores ou non, jour favorable aux contaminations ou non. Utilisé successivement pour les Avertissements Agricoles puis le Bulletin de Santé du Végétal (Chambre d'Agriculture Occitanie, 2018), ce modèle s'est avéré particulièrement robuste en région Occitanie, zone où le risque phomopsis est historiquement le plus élevé. Son utilisation reste toutefois limitée, l'accès à des données météorologiques fiables (notamment pour l'humidité relative) et de type horaire (température moyenne, humidité relative) étant difficile. Il serait donc utile de disposer d'un autre modèle permettant de palier ces difficultés.

SimMat (Aubertot *et al.*, 2006) est un modèle mécaniste, déterministe, et dynamique. Il est dérivé d'un premier modèle conçu pour prédire la date à laquelle 50% des pseudothèces de *Leptosphaeria maculans* sont matures, et les dates d'émission des ascospores responsables du phoma du colza (Salam *et al.*, 2003).

Le modèle SimMat ne nécessite que trois variables d'entrée (date de récolte, température journalière moyenne et pluviométrie journalière) et comporte sept paramètres. Contrairement à Asphodel, les variables de sortie de SimMat sont quantitatives : il s'agit de la proportion journalière de périthèces matures et de la proportion journalière de périthèces matures émettant leurs ascospores.

Nous avons retenu ce modèle en raison de la similarité biologique entre *L. maculans* et *D. helianthi*. Il s'agit de deux champignons ascomycètes dont le cycle est comparable, avec une phase téléomorphe et une phase anamorphe. Les maturations des pseudothèces (pour *L. maculans*) et des périthèces (pour *D. helianthi*) dépendent des mêmes variables climatiques. Les températures favorables à la maturation des fructifications de la phase sexuée sont proches, entre 15 et 20°C pour *L. maculans* (Naseri et al., 2009) et estimées entre 8 et 20°C pour *D. helianthi* (Moinard and Eychenne, 1998 ; Fabregue, 1992). Des phases de recharge en asques et ascospores de ces fructifications ont lieu durant le processus de maturation chez les deux champignons (Muntanola-Cvetkovic et al., 1989 ; Aubertot et al., 2004).

L'objectif de cette étude est d'adapter SimMat au phomopsis du tournesol, afin de disposer d'un nouveau modèle, qui en permettant de s'affranchir de données météorologiques difficiles d'accès pour les acteurs du conseil, serait plus largement utilisable en routine qu'Asphodel dans l'ensemble des zones de production du tournesol.

Cette communication présente l'adaptation des paramètres du modèle SimMat (initialement déterminés pour *L. maculans*, agent causal du phoma du colza) au cas de *Diaporthe helianthi*, ainsi que l'analyse de sa qualité de prédiction.

MATERIEL ET MÉTHODE

DESCRIPTION DU MODELE SIMMAT

Le modèle SimMat est basé sur la notion de jour favorable à la maturation des organes de reproduction sexuée. Il a été initialement calibré pour des pseudothèces de *L. maculans*, agent causal du phoma du colza. La maturation de ces derniers est calculée en utilisant un cumul de jours favorables au processus de maturation à partir de la date de récolte moyenne des parcelles de colza environnantes porteuses de nécroses de phoma. Les variables de sortie du modèle sont : d'une part, la proportion journalière de fructifications mûres (vides et non vides), et d'autre part, la proportion de fructifications mûres et non vides qui émettent leurs ascospores. Le modèle comporte trois variables d'entrée : la date de récolte moyenne des colzas environnants, la température moyenne journalière, et la pluviométrie moyenne journalière. Dans ce modèle, un jour donné est considéré comme favorable à la maturation si la température moyenne journalière est comprise entre deux valeurs seuil θ_{max} et θ_{min} , et si les précipitations cumulées sur les n_d derniers jours sont supérieures à une valeur seuil R_{min} . La probabilité qu'une fructification soit mûre suit une distribution gaussienne en fonction du nombre de jours favorables cumulés favorables à la maturation. Cette distribution est caractérisée par deux paramètres : N_{FD} , l'espérance du nombre de jours favorables requis pour la maturation et σ_{FD} , l'écart-type de ce nombre de jours. La variable binaire "jour favorable à la maturation" prend la valeur 1 si le jour est favorable, et la valeur 0 s'il ne l'est pas. La proportion P_{MP} de fructifications mûres en fonction du temps (j) est exprimée selon l'équation 1. P_{MP} est la somme de la proportion de fructifications mûres vides P_{EP} et de celle des fructifications prêtes à émettre leurs ascospores. Le taux des fructifications non-vides R_{MFP} sur l'ensemble des fructifications mûres est donné par l'équation 3, où R_{EP} est le taux de fructifications vides au jour j (Equation 2). La variable $r(j)$ est la pluviométrie journalière au jour j .

$$P_{MP}(j) \cong \frac{1}{\sigma_{FD}\sqrt{2\pi}} \int_0^{CDFM(j)} e^{-\frac{(x-N_{FD})^2}{2\sigma_{FD}^2}} dx \quad \text{Equation 1}$$

$$R_{EP}(j) = R_{EP}(j-1) + (P_{MP}(j) - R_{EP}(j-1)) * (1 - e^{-k*r(j)}), \text{ avec } R_{EP}(1) = 0 \quad \text{Equation 2}$$

$$R_{MFP}(j) = (P_{MP}(j) - R_{EP}(j))/(1 - R_{EP}(j)) \quad \text{Equation 3}$$

Le modèle SimMat ne comporte que 7 paramètres :

- $\theta_{\max}$ et $\theta_{\min}$, valeurs seuils de température moyenne journalière favorables à la maturation des fructifications ($^{\circ}\text{C}$),
- $R_{\min}$, valeur seuil de pluviométrie moyenne journalière favorable à la maturation des fructifications (mm),
- N_d , nombre de jours sur lesquels cumuler la pluviométrie (jour),
- N_{FD} et σ_{FD} (jour), respectivement espérance et écart-type du nombre de jours favorables requis pour la maturation des fructifications ; ce sont les paramètres de la distribution de la probabilité qu'une fructification soit mûre,
- k , paramètre définissant la proportion de fructifications mûres qui vont émettre leurs ascospores en fonction de la pluviométrie journalière (mm^{-1}).

Dans cette étude, toutes les simulations ont débuté au 1^{er} février car le processus de maturation peut débuter au cours de ce mois en cas d'hiver doux (Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989). Il s'agit également de la date retenue pour le démarrage des simulations dans ASPHODEL (Délou and Moinard, 1997).

DESCRIPTION DU JEU DE DONNEES UTILISE POUR L'ESTIMATION DES PARAMETRES

Maturation des périthèces

Un jeu de données de 10 sites-années a été mobilisé. Il est issu des travaux menés par le Service Régional de la Protection des Végétaux de Midi-Pyrénées pour la construction du modèle ASPHODEL. Un suivi de l'évolution de la maturation de périthèces de *D. helianthi* a été réalisé sur 10 parcelles de tournesol de Haute-Garonne (31) et du Tarn (81), entre 1989 et 1997. Les résidus de tournesol infectés ont été laissés intacts à la surface du sol après la récolte du tournesol. Le prélèvement régulier d'échantillons de cannes à partir desquelles des périthèces sont disséqués puis observés sous microscope (5 cannes x 5 périthèces x 10 asques par échantillon ; Fabregue, 1992) a permis le suivi dynamique de l'évolution de la maturité des périthèces sur 12 à 25 dates de mars à août. Un total de 179 observations est disponible (Tableau I).

Variables climatiques

Les données météorologiques journalières (température minimale, maximale et pluviométrie) sont issues de la base de données SAFRAN de Météo France.

CLASSE DE PRECOCITE DES DYNAMIQUES DE MATURATION DE PERITHECES

En fonction des scénarios climatiques rencontrés, la maturation des périthèces a lieu plus ou moins rapidement. Afin de caractériser la précocité des dynamiques de maturation de périthèces de *D. helianthi*, nous proposons d'utiliser trois classes ordinales : précoce, intermédiaire, tardive. Des études menées en Roumanie et en Yougoslavie ont suivi des émissions d'ascospores de *D. helianthi* (Jinga *et al.*, 1987 ; Petrov *et al.*, 1981). Ils ont détecté des émissions d'ascospores en avril et mai et une intensification du phénomène en juin et juillet (Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989). Nous avons ainsi considéré que lorsque le seuil de 50% de maturation de périthèces était atteint durant les mois d'avril et mai, la dynamique est dans la classe « précoce ». Lorsque ce seuil est atteint durant les mois de juin et juillet, la dynamique est dans la classe « intermédiaire », et à partir du mois d'août, la dynamique est dans la classe « tardive ».

Tableau I: Présentation du jeu de données utilisé pour l'estimation des paramètres (Provenance des résidus infectés, année d'observation, nombre d'observations, période d'observation des périthèces, gamme de variation des pourcentages de périthèces mûrs observés sur la période, et précocité de la maturation des périthèces).

Table I: Presentation of the dataset used for parameter estimation (origin of infected stubble, year of observation, number of observations, period of perithecia observation, observed percentage range, maturation earliness).

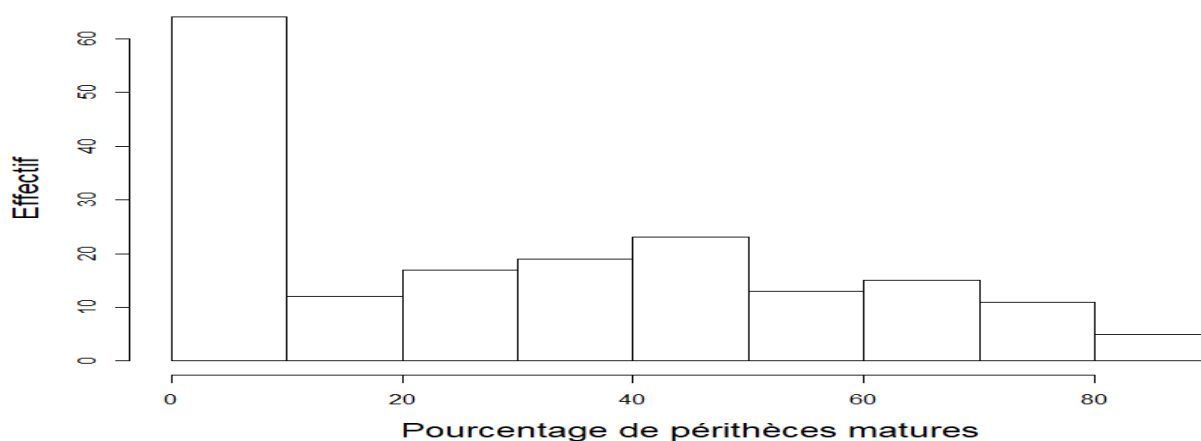
Provenance des résidus infectés 31 : Haute-Garonne 81 : Tarn	Année	Nombre d'observations	Période d'observation des périthèces	Gamme de variation des pourcentages de périthèces mûrs	Précocité de la dynamique de maturation
Revel (31)	1989	24	21/04/1989 au 28/08/1989	0 à 76%	Tardive
Revel (31)	1989	24	21/04/1989 au 28/08/1989	0 à 63%	Tardive
Cahuzac-sur-Vere (81)	1990	23	30/03/1990 au 26/07/1990	0 à 73%	Intermédiaire
Quint-Fonsegrives (31)	1990	14	15/03/1990 au 22/07/1990	0 à 84%	Précoce
Quint-Fonsegrives (31)	1991	14	15/03/1991 au 22/07/1991	0 à 83%	Intermédiaire
Balma (31)	1992	25	15/04/1992 au 27/07/1992	0 à 75%	Intermédiaire
Ondes (31)	1993	17	15/04/1993 au 21/07/1993	0 à 87%	Précoce
Balma (31)	1994	12	28/03/1994 au 26/05/1994	8 à 50%	Précoce
Balma (31)	1995	14	20/03/1995 au 29/05/1995	12 à 50%	Précoce
Auzeville (31)	1997	12	10/04/1997 au 27/06/1997	10 à 72%	Précoce

POURCENTAGE DE PERITHECES MATURES OBSERVES

La répartition des pourcentages de périthèces mûres est présentée Figure 1. Un tiers des pourcentages de périthèces mûres observés sont compris entre 0 et 10%. Les deux tiers des observations restant semblent répartis de manière uniforme entre 10 et 90%.

Figure 1 : Répartition des pourcentages de périthèces mûres observés sur l'ensemble du jeu de données.

Figure 1: Répartition of observed mature perithecia percentages on the entire dataset.



DESCRIPTION DE L'ALGORITHME D'ESTIMATION DES PARAMETRES DE SIMMAT

L'estimation des paramètres du modèle *SimMat_Diaporthe* a été réalisée en 3 étapes. Tout d'abord, la qualité de prédiction initiale de *SimMat_Diaporthe* a été mesurée en utilisant les valeurs des 7 paramètres issues de la littérature et de dires d'expert (Tableau II). Pour cela, les taux de maturation observés ont été directement comparés aux valeurs prédites par le modèle. Deuxièmement, la meilleure combinaison de paramètres à ajuster a été identifiée en utilisant une validation croisée, en prenant soin de retirer toute corrélation spatio-temporelle potentielle. Pour ce faire, chacune des situations du jeu de donnée a été utilisée pour évaluer la qualité de prédiction du modèle après avoir ajusté les paramètres en utilisant toutes les autres situations indépendantes (i.e. avec une année et un site différents). Pour un modèle à n paramètres, il y a $\sum_{i=1}^{i=n} C_i^n = 2^n$ combinaisons possibles de paramètres à ajuster (en comptant la combinaison où aucun paramètre n'est ajusté). Dans notre cas, les $2^7 = 128$ possibilités ont toutes été considérées. La combinaison qui avait l'erreur de prédiction la plus basse a été sélectionnée. Enfin, cette combinaison de paramètres a été ajustée en utilisant le jeu de données complet pour obtenir les meilleures valeurs de paramètres possibles.

Trois critères ont été utilisés pour décrire la qualité de prédiction du modèle et sa qualité d'ajustement (Wallach *et al.*, 2006). La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de prédiction ($RMSE_p$, équation 4) est un indicateur d'écart entre données observées et simulées. Ses valeurs sont comprises dans l'intervalle $[0 ; +\infty[$. En complément, le biais de prédiction (Equation 5) est un indicateur des erreurs non-aléatoires. Il est compris dans l'intervalle $]-\infty ; +\infty[$. Des valeurs de $RMSE_p$ et d'un biais de prédiction proches de 0 indiquent une bonne qualité de prédiction. L'efficacité de prédiction (Equation 6) est un indicateur de la qualité de prédiction d'un modèle. Ses valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-\infty ; +100]$. Une efficacité de 100 indique que le modèle prédit parfaitement les données, une efficacité de 0 correspond à un modèle qui retournerait la moyenne des valeurs observées pour chaque valeur prédite.

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad \text{Equation 4}$$

$$\text{Biais}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \quad \text{Equation 5}$$

$$\text{Efficience}_p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \quad \text{Equation 6}$$

Avec n le nombre d'observations, Y_i^{obs} la $i^{\text{ème}}$ donnée observée, Y_i^{sim} la $i^{\text{ème}}$ donnée simulée, $\bar{Y}$ la moyenne des observations.

Ces critères ont été mesurés à chaque étape du processus d'estimation. Pour l'évaluation de la qualité de prédiction initiale, ils sont notés de la manière suivante : $RMSE_p$, Biais_p et Efficience_p . Pour la validation croisée, ils sont notés respectivement : $RMSE_{cv}$, Biais_{cv} et Efficience_{cv} . Enfin pour la dernière étape correspondant à l'évaluation de la qualité d'ajustement (il n'y a alors plus d'indépendance entre données pour estimer la qualité de prédiction du modèle et données utilisées pour estimer les paramètres) : $RMSE_a$, Biais_a et Efficience_a .

EVALUATION QUALITATIVE DU MODELE

En plus des critères statistiques présentés ci-dessus, le modèle *SimMat_Diaporthe* a été évalué de manière qualitative pour deux variables : d'une part, le taux de maturité des périthèces ; d'autre part la classe de précocité de la dynamique observée. Cette évaluation qualitative permet de disposer d'évaluations complémentaires des performances du modèle.

Les taux de maturation prédits et observés ont été divisés en quatre classes : [0-25%], [25-50%], [50-75%] et [75-100%]. Les dynamiques de maturation ont été classées en 3 précocités : précoce, intermédiaire et tardive, en fonction de la période où le seuil de 50% du taux de maturation des périthèces a été atteint.

La capacité de prédiction de ces deux variables par le modèle a été évaluée à l'aide du kappa de Cohen pondéré quadratiquement (Agresti, 2010) :

$$Kw = \frac{Po(w) - Pe(w)}{1 - Pe(w)} \quad \text{Equation 7}$$

Où $Po(w) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r wijpij$ est la précision de SimMat_Diaporthe et $pe(w) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r wijpi.p.j$ est la précision d'un modèle théorique aléatoire.

$$\text{Avec } wij = 1 - \frac{(i-j)^2}{(r-1)^2} ; pij = \frac{nij}{n} ; pi. = \frac{ni.}{n} ; p.j = \frac{n.j}{n}$$

i est la i^{ème} colonne de la matrice des poids, j est la j^{ème} ligne de la matrice des poids. r est le nombre de classes (ici il y en a trois). n est le nombre total d'observations.

Le kappa de Cohen permet de mesurer le degré de concordance entre deux variables qualitatives ordinales. Dans notre cas, en effet, prédire par exemple une précocité «tardive» alors que la valeur observée se situe dans la classe «précoce» est une plus grande erreur que prédire une précocité «intermédiaire». La pondération quadratique a été choisie car elle permet d'avoir accès au pourcentage de variabilité expliquée par le modèle. Le kappa varie de -1 (anti-corrélation totale entre les deux variables) à 1 (accord parfait).

IMPLEMENTATION INFORMATIQUE

SimMat et l'algorithme d'estimation des paramètres ont été implémentés sous R (version 3.5). Plusieurs fonctions existent sous R pour optimiser des fonctions. La fonction optim de la librairie {stats} utilise la stratégie du maximum de vraisemblance. La méthode "L-BFGS-B" (Byrd, 1995) contraint les paramètres entre deux bornes. C'est cette méthode qui a été utilisée pour identifier les valeurs de paramètres minimisant l'erreur quadratique du modèle. Les packages {irr} et {vcd} sous R ont été utilisés pour calculer les kappa.

RESULTATS

LES VALEURS DES PARAMETRES AVANT ET APRES ESTIMATION

Les gammes de valeurs explorées pour chaque paramètre par l'algorithme, les valeurs des paramètres du modèle SimMat_Diaporthe utilisées avant et obtenues après estimation sur l'ensemble du jeu de données sont présentées Tableau II.

Tableau II : Gammes de valeurs explorées par l'algorithme pour chaque paramètre, valeurs des paramètres avant et après calibration de SimMat_Diaporthe par validation croisée. Les valeurs initiales (avant estimation) de θ_{max} , θ_{min} et R_{min} ont été définies d'après deux études (Moinard and Eychenne, 1998 ; Fabregue, 1992) et par expertise ; Nd, NFD, σ_{FD} et k ont été définis par expertise ou correspondent au modèle SimMat-Phoma du colza. Les valeurs en gras correspondent à la combinaison de paramètres identifiée par validation croisée.

Table II : Tested range by the algorithm for each parameter, values of parameters before and after calibration of SimMat_Diaporthe. The initial values of θ_{max} , θ_{min} and R_{min} were defined according to literature (Moinard and Eychenne 1998 ; Fabregue, 1992). Nd, NFD, σ_{FD} and k were defined by expertise or were similar to the initial values of SimMat-Phoma stem canker on oilseed rape. Bold values correspond to the parameter combination selected by cross validation.

Valeurs	θ_{max} (°C)	θ_{min} (°C)	R_{min} (mm)	Nd (jour)	NFD (jour)	σ_{FD} (jour)	k (mm ⁻¹)
Gamme explorée	[15-35]	[0-15]	[0-20]	[1-30]	[1-100]	[1-100]	[0-1]
Initiales	28,0	9,0	4,0	7	30,0	15,0	0,046
Finales	29,0	9,7	11,6	8	22,9	15,0	0,046

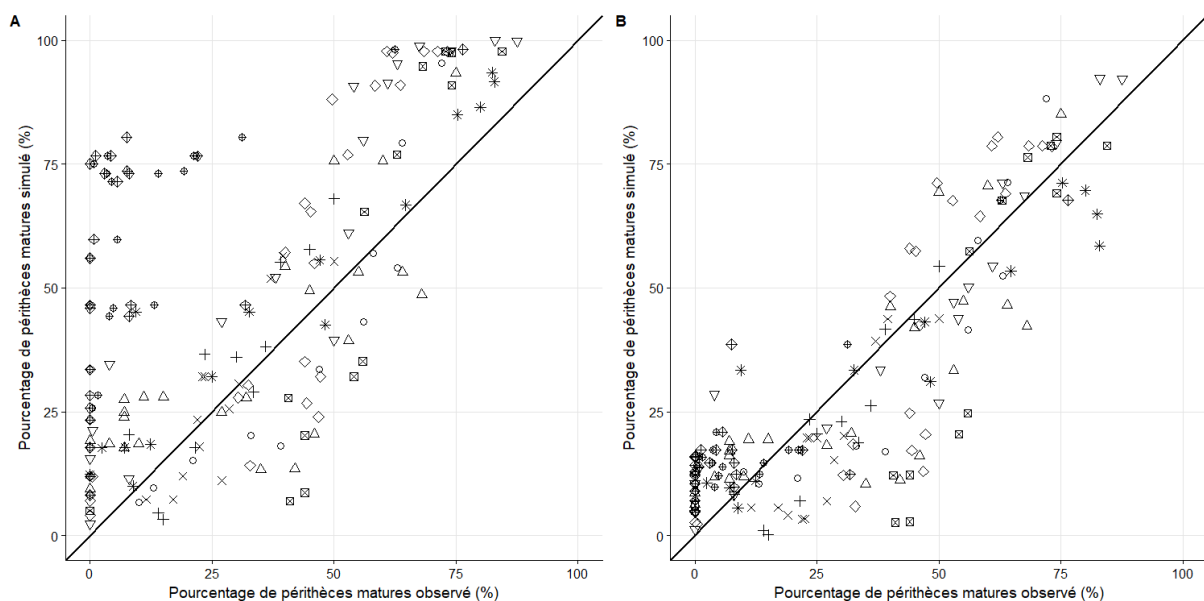
Les paramètres σ_{FD} et k semblent avoir été correctement estimés puisqu'ils restent inchangés. Les valeurs finales de trois autres paramètres (θ_{max} , θ_{min} et N_d) restent proches de celles définies dans la littérature et par expertise. En revanche, la valeur du paramètre R_{min} a beaucoup augmenté (11,6 contre 4 mm). L'espérance du nombre de jours favorables requis pour la maturation des périthèces NFD a diminué significativement (22,9 contre 30 jours).

COMPARAISON ENTRE OBSERVATIONS ET SIMULATIONS AVANT ET APRES CALIBRATION DU MODELE

La comparaison entre les taux de maturation des périthèces observés et prédits sur l'ensemble du jeu de données (179 points) avant et après calibration est présentée Figure 2. Les matrices de confusion pour les 4 classes de pourcentage observées et prédites avant et après calibration de SimMat_Diaporthe sont présentées Figure 3A et B. Les matrices de confusion pour les 3 classes de précocité du seuil de maturation de 50% observées et prédites avant et après calibration sont présentées (Tableau III).

Figure 2 : Comparaison entre les 179 observations et les prédictions du pourcentage de périthèces matures par SimMat_Diaporthe sur le jeu de données entier avant estimation des paramètres (A) ($\theta_{max} = 28^\circ\text{C}$, $\theta_{min} = 9^\circ\text{C}$, $R_{min} = 4\text{ mm}$, $N_d = 7\text{ jours}$, $NFD = 30\text{ jours}$, $\sigma_{FD} = 15\text{ jours}$, $k = 0,046\text{ mm}^{-1}$) et après estimation des paramètres (B) ($\theta_{max} = 29^\circ\text{C}$, $\theta_{min} = 9,7^\circ\text{C}$, $R_{min} = 11,6\text{ mm}$, $N_d = 8\text{ jours}$, $NFD = 22,9\text{ jours}$, $\sigma_{FD} = 15\text{ jours}$, $k = 0,046\text{ mm}^{-1}$).

Figure 2 : Comparison between the 179 observations and SimMat_Diaporthe predictions for the entire dataset before optimization (A) with the initial values ($\theta_{max} = 28^\circ\text{C}$, $\theta_{min} = 9^\circ\text{C}$, $R_{min} = 4\text{ mm}$, $N_d = 7\text{ days}$, $NFD = 30\text{ days}$, $\sigma_{FD} = 15\text{ days}$, $k = 0.046\text{ mm}^{-1}$) and after optimization (B) with the final values ($\theta_{max} = 29^\circ\text{C}$, $\theta_{min} = 9.7^\circ\text{C}$, $R_{min} = 11.6\text{ mm}$, $N_d = 8\text{ days}$, $NFD = 22.9\text{ days}$, $\sigma_{FD} = 15\text{ days}$, $k = 0.046\text{ mm}^{-1}$).



Légende : $\circ$ Auzeville, 1997 ; $\triangle$ Balma, 1992 ; $+$ Balma, 1994 ; $\times$ Balma, 1995 ; $\diamond$ Cahuzac, 1990 ; ∇ Ondes, 1993 ; $\boxtimes$ Quint, 1990 ; $*$ Quint, 1991 ; $\oplus$ Revel, 1989 ; $\otimes$ Revel, 1989

Avant estimation de SimMat_Diaporthe, l'écart global entre les taux de maturation des périthèces prédits et observés était élevé (Figure 1A ; $RMSE_p = 29\%$). Les pourcentages prédits ont été globalement surestimés par rapport aux pourcentages observés (Figure 1A ; biais_p de -17%). La matrice de confusion Figure 3A nous renseigne sur les catégories qui ont été sur-estimées. Plus de la moitié des observations des classes [0-25%] et [50-75%] ont été prédites dans des classes supérieures. Les pourcentages observés dans la classe [25-50%] sont prédits sur les classes [0-25%] à [50-75%]. Seules les observations de la classe [75-100%] ont été correctement prédites. Le modèle est mauvais car il est moins performant que la moyenne des pourcentages observés (Efficienc_p = -30%). De même, le kappa de Cohen pondéré obtenu avant calibration de SimMat_Diaporthe est de 0,52, traduisant un accord modéré (Landis and Koch, 1977).

Figure 3 : Matrice de confusion entre les classes de pourcentages de maturation observés et prédits par SimMat_Diaporthe avant (A) et après (B) estimation.

Figure 3: Confusion matrix between the classes of percentage observed and predicted by SimMat_Diaporthe before (A) and after (B) estimation.

A		Classe de pourcentage de maturation prédite					
Classe de pourcentage de maturation observée		[0-25]	]25-50]	]50-75]	]75-100]	Total	
	[0-25]	42	25	14	7	88	B
	]25-50]	12	19	13	3	47	
	]50-75]	0	5	7	24	36	
	]75-100]	0	0	0	8	8	
	Total	54	49	34	42	179	

B		Classe de pourcentage de maturation prédite					
Classe de pourcentage de maturation observée		[0-25]	]25-50]	]50-75]	]75-100]	Total	
	[0-25]	85	3	0	0	88	B
	]25-50]	25	17	5	0	47	
	]50-75]	2	7	16	11	36	
	]75-100]	0	0	5	3	8	
	Total	112	27	26	14	179	

La modification des paramètres θ_{max} , θ_{min} , R_{min} , N_d et N_{FD} lors de la validation croisée a permis de diviser par 1,8 la RMSE ($RMSE_{cv} = 16\%$ contre $RMSE_p = 29\%$). L'amélioration du biais ($bias_{cv}$ moyen = 2% contre un $bias_p = -17\%$) indique une légère sous-estimation globale de l'ensemble des pourcentages. L'efficacité_{cv} moyenne devient positive (36% contre une efficacité_p de -30%).

Après l'estimation des 5 paramètres retenus par l'algorithme, pour l'ensemble du jeu de données, SimMat_Diaporthe a une bonne qualité d'ajustement ($RMSE_a = 14\%$, $Biais_a = 0,7\%$, efficacité_p = 71%). Les erreurs du modèle sont moins importantes : la Figure 2B et la matrice de confusion Figure 3B indiquent que les observations de la catégorie [0-25%] sont bien prédites. Les observations de la classe]50-75%] sont mieux prédites. En revanche, les classes]25-50%] et]75-100%] sont sous-estimées. Le kappa mesuré (0,804) confirme l'amélioration générale car il s'agit d'un très bon accord : le modèle explique plus de 80% de la variabilité des classes de maturation observées.

LA PREDICTION DE LA PRECOCITE DU SEUIL DE 50% DE PERITHECES MURS

Avant calibration, le modèle SimMat_Diaporthe a correctement prédit toutes les dynamiques de maturation « précoces » ainsi que 2 situations à précocité « Intermédiaire » sur 3. Par contre, le modèle n'a pas prédit correctement les situations à précocité « tardive ». Son kappa $K_w = 0,681$ indique un accord satisfaisant (Landis and Koch, 1977). Après calibration (Figure 3B), ses résultats pour la classe « Intermédiaire » sont inchangés. Bien que SimMat_Diaporthe n'ait pas prédit correctement plus de la moitié des situations à précocité « précoce » (son kappa descend à 0,462, indiquant un accord modéré), il a prédit correctement les 2 situations à précocité « tardive ».

Figure 3 : Matrice de confusion entre les précocités observées et prédites par SimMat_Diaporthe avant (A) et après (B) calibration.

Figure 3: Confusion matrix between the classes of precocity observed and predicted by SimMat_Diaporthe before (A) and after (B) calibration.

A		Classe de précocité prédite			
Classe de précocité observée		Précoce	Interm.	Tardive	Total
	Précoce	5	0	0	5
	Interm.	1	2	0	3
	Tardive	0	2	0	2
	Total	6	4	0	10

B		Classe de précocité prédite			
Classe de précocité observée		Précoce	Interm.	Tardive	Total
	Précoce	2	2	1	5
	Interm.	1	2	0	3
	Tardive	0	0	2	2
	Total	3	4	3	10

Interm. : Intermédiaire

DISCUSSION

LES VALEURS DE PARAMETRES OBTENUES APRES ESTIMATION

Une étude réalisée en France sur les effets de la température et de la pluviométrie sur *D. helianthi* a montré que la maturation des périthèces était ralentie à une température inférieure à 8°C et supérieure à 20°C (Fabregue, 1992). Les seuils de température retenus par l'algorithme sont donc cohérents avec ce qui est connu de la biologie du champignon. Le seuil retenu par l'algorithme pour Rmin semble bien plus élevé que le seuil initial et est probablement plus proche de la quantité de pluie nécessaire à une réelle humectation des résidus restés au sol. La valeur finale du nombre de jour Nd est proche de la valeur initiale.

Le nombre de jours Nd sur lesquels cumuler la pluviométrie pour déterminer les jours favorables à la maturation des périthèces de *D. helianthi* reste proche de celui de *L. maculans* (8 contre 7 jours ; Aubertot *et al.*, 2006). En revanche, les valeurs des autres paramètres ($\theta_{max} = 29^{\circ}\text{C}$, Rmin = 11,6 mm, NFD = 22,9 jours et $\sigma_{FD} = 15$) sont différents de ceux obtenus pour *L. maculans* ($\theta_{max} = 22^{\circ}\text{C}$, Rmin = 4 mm, NFD = 43 jours et $\sigma_{FD} = 5$ jours). Ceci indique que malgré des cycles de vie proches, les deux espèces possèdent bien des caractéristiques biologiques propres.

Les seuils de température retenus pour SimMat_*Diaporthe* sont proches de ceux utilisés par ASPHODEL pour le compartiment maturation ($\theta_{min_{ASPHODEL}} = 9^{\circ}\text{C}$, $\theta_{max_{ASPHODEL}} = 28^{\circ}\text{C}$; Délos and Moinard 1997). Les paramètres du modèle SimMat_*Diaporthe* semblent ainsi cohérents avec la biologie de *D. helianthi*.

RESULTATS DE LA CALIBRATION

Les sur-estimations des taux de maturation observées entre 0 et 25% avant calibration étaient liées au site de Revel. Entre 50 et 75%, les prédictions sur-estimées venaient de Cahuzac-sur-Vère, Ondes et Quint-Fonsegrives en 1990.

Après calibration, les sous-estimations constatées entre 25 et 50 % des taux de maturation des périthèces prédits par SimMat_*Diaporthe* pourraient être expliquées par deux faits : d'une part, les dynamiques de maturation à Revel en 1989 se sont révélées tardives (août) et le taux de périthèces mûrs n'a pas dépassé 80% en dépit de l'hiver doux, ce qui s'explique par la pluviométrie printanière faible. Cette dynamique a peut-être affecté la calibration de SimMat. D'autre part, le choix de la date de début des simulations (1^{er} février) a pu également avoir un impact. Les premiers périthèces mûrs peuvent être observés dès février (Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989). Cette date aurait pu être considérée comme un paramètre et être optimisée.

La dégradation de la qualité de prédiction des classes de précocité par SimMat_*Diaporthe* après ajustement peut s'expliquer par le protocole utilisé. En effet, l'estimation des paramètres n'a pas été réalisée pour un critère statistique adapté à la variable ordinaire « classe de précocité » (i.e. Kappa de Cohen pondéré quadratiquement), mais pour un critère statistique (RMSE_p) représentant les erreurs de prédiction du taux de maturation de périthèces. L'application de l'algorithme maximisant le Kappa de Cohen pondéré quadratiquement permettrait d'améliorer la prédiction des classes de précocité.

LE JEU DE DONNEES UTILISE

Le jeu de données utilisé est de petite taille. Ceci s'explique par le coût d'acquisition de ces données : en effet, le protocole de suivi de la maturation des périthèces requiert des compétences spécifiques et est très chronophage. De plus, ce jeu de données n'a pas été acquis spécifiquement pour cette étude. Enfin, la provenance géographique des résidus observés était assez limitée, tout en correspondant toutefois au berceau historique du phomopsis en France.

Par ailleurs, ce jeu de données est déséquilibré. En effet, 33% des données (37 observations) correspondent à un taux de maturation compris entre 0 et 10%. Ces taux de maturation sont surprésentés. Le reste du jeu de données se répartit sur les taux de maturation allant de 10 à 87,2 % (avec des effectifs allant de 5 à 23 observations).

En dépit de sa petite taille et de son hétérogénéité, ce jeu présente des dynamiques variées. Cinq situations affichent des dynamiques de maturation des périthèces précoces : le seuil de 50% de périthèces mûrs a été atteint en mai en raison d'hivers doux (Quint-Fonsegrives en 1990, Ondes en 1993, Balma en 1994 et 1995 et Auzeville en 1995).

Trois situations ont présenté des précocités intermédiaires, avec le seuil de 50% atteint en juin (Cahuzac-sur-vère en 1990, Quint-Fonsegrives en 1991 et Balma en 1992). Enfin, les deux situations de Revel en 1989 ont présenté des dynamiques tardives (en dépit de l'hiver doux) commençant fin mai et finissant en août, ce qui s'explique par la faible pluviométrie au cours du printemps en 1989. De manière générale, les études réalisées sur les périthèces et les émissions d'ascospores ont souligné l'importance de températures douces et de la pluviométrie favorisant la reproduction sexuée champignon (Jinga *et al.*, 1987 ; Petrov *et al.*, 1981 ; Muntanola-Cvetkovic *et al.*, 1989).

Un jeu de donnée plus grand pourrait permettre d'améliorer encore le paramétrage du modèle pour le phomopsis. Des suivis de maturation de périthèces de *D. helianthi* dans d'autres régions en France que l'Occitanie pourraient diversifier le jeu de données en y ajoutant de nouvelles dynamiques et taux de périthèces mûrs sous des conditions climatiques différentes.

En tout état de cause, la problématique nécessite de recueillir plus de données afin de progresser encore dans l'aide à la décision des agriculteurs devant faire face au champignon *Diaporthe sp.*

LA PRISE EN COMPTE D'UNE EVENTUELLE EVOLUTION DE L'AGENT PATHOGENE

Des études récentes ont fait état d'une évolution significative des populations de *Diaporthe sp.* en Australie (Thompson *et al.*, 2011) et aux Etats-Unis (Mathew *et al.*, 2015), avec l'apparition de nouvelles espèces. Aucune investigation sur ce sujet n'a encore été menée en France, ni sur les caractéristiques de leur épidémiologie : conditions favorables à la formation et à la maturation des périthèces, dynamiques de maturation.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons démontré l'efficacité d'un algorithme original pour améliorer la qualité prédictive d'un modèle quantitatif.

Une analyse de sensibilité globale pourrait être réalisée afin d'identifier les paramètres ayant le plus fort impact sur les variables de sortie. Habituellement, les analyses de sensibilité précèdent l'estimation des paramètres car il n'est numériquement pas possible de tester toutes les combinaisons de paramètres à ajuster. Ici, le faible nombre de paramètres (7) a permis la mise en place d'une méthode originale pour tester l'ensemble des 128 combinaisons de paramètres possibles. On s'est donc affranchi de toute sélection avant l'étape d'estimation.

Une comparaison pourrait être réalisée entre SimMat_*Diaporthe* et ASPHODEL (Délès and Moinard, 1997) en utilisant des variables proches (date d'émission significative d'ascospores pour ASPHODEL, et proportion de périthèces libérant leurs spores pour SimMat_*Diaporthe*). Un plan de simulation pourrait être réalisé avec une grande base de données climatique provenant de différentes aires de production du tournesol. Une partie du jeu de données pourrait être utilisée pour définir un seuil de proportion de périthèces matures émettant leurs ascospores pour SimMat_*Diaporthe* à partir des dates de début d'émission d'ascospores prédites par ASPHODEL. L'autre partie du jeu de données pourra servir à comparer les deux modèles.

Après comparaison avec le modèle ASPHODEL, le modèle générique SimMat_*Diaporthe* sera proposé aux acteurs du BSV en complément dans un premier temps du modèle ASPHODEL.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les membres d'Agroclim (Unité de Service INRA) pour la transmission des données climatiques, ainsi que Luc Champolivier (Terres Inovia, Toulouse), François Brun (Acta, Toulouse), Philippe Debaeke (INRA UMR AGIR, Toulouse) et Tom Gulya (USDA) pour leur conseils.

BIBLIOGRAPHIE

- Agresti A., 2010. *Matched-Pairs Data with Ordered Categories*. In: Analysis of Ordinal Categorical Data (John Wiley & Sons), Wiley, New Jersey, 2nd ed., 225-262.
- Aubertot J.-N., Salam M.-U., Diggle A.-J., Dakowska S., Jedryczka M., 2006. Simmat, a new dynamic module of blackleg sporacle for the prediction of pseudothecial maturation of *L. maculans*/ *L. biglobosa* species complex. parameterisation and evaluation under polish conditions. *Integrated control in oilseed crops iobc/wprs bulletin*, 29, 7, 277-85
- Aubertot J.-N., Pinochet X. Doré T., 2004. Analysis of the effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) development on two winter oilseed rape cultivars. *Crop Protection*, 23, 635-645.
- Byrd R., Lu P., Nocedal J., Zhu C., 1995. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing* 16 :1190-1208. <http://dx.doi.org/10.1137/0916069>
- Chambre d'Agriculture Occitanie, 2018. Bulletin de Santé du Végétal « Grandes cultures ». Edition Ouest-Occitanie, n°29 du 21 juin 2018, 8 p. https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/512_Fichiers-communs/documents/BSV/BSV_ex-MP/Grandes_cultures/bsv_grandes_cultures_N29_21062018.pdf
- Debaeke P., Estragnat A., 2003. A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: phomopsis stem canker. *Field Crops Research*, 83, 2, 139-55. doi:10.1016/s0378-4290(03)00071-6.
- Debaeke P., Estragnat A., Reau R., 2003. Influence of crop management on sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi*). *Agronomie*, 23, 581-592.
- Debaeke, P., Moinard J., 2010. Effect of crop management on epidemics of phomopsis stem canker (*Diaporthe helianthi*) for susceptible and tolerant sunflower cultivars. *Field Crops Research*, 115, 50-60
- Délos M., Moinard J., 1995. Etude et surveillance du phomopsis : des pièges au modèle. *Phytoma – La Défense des Végétaux*, 473, 25-27.
- Délos M., Moinard J., 1997. ASPHODEL : modele de simulation des épidémies de phomopsis du tournesol (*Diaporthe helianthi*). In: Cinquième Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, ANPP, Tours, France, 413-420.
- Desanlis M., Aubertot J.-N., Mestries E., Debaeke P., 2013. Analysis of the influence of a sunflower canopy on *Phomopsis helianthi* epidemics as a function of cropping practices. *Field Crops Research*, 149, 63-75.
- Fabregue C., 1992. Phomopsis et avertissements agricoles. *Oléoscope*, 8:11.
- Fayret J., Assémat P., 1987. Evolution du *Diaporthe helianthi* Munt-Cvet et al. et différenciation des organes reproducteurs sur les plantes de tournesol après la période de végétation. *Inform. Techn. CETIOM* N°98, 2-11.
- Jinga V., Iliescu H., Rafaila C., Ciurea A., Ionita A., Csép N., 1987. Cercetari privind prognoza aparitiei atacului de patare bruna si fringere a tulpinilor (*Diaporthe*-Phomopsis) de floarea-soarelui. *Analele Institutul de Cercetari pentru Protectia Plantelor*, 20, 57-68
- Landis J.-R., Koch G.-G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159 -174.

- Mathew F.-M., Alananbeh K.-M., Jordhal J.-G., Meyer S.-M., Castlebury L.-A., Gulya T.-A., Markell S.-G., 2015. Phomopsis stem canker : a reemerging threat to sunflower (*Helianthus annuus*) in the United States. *Phytopathology*, 105, 7, 990-997.
- Masirevic S., 2016. Sunflower diseases research progress and management. *In*: Proceedings of the 19th International Sunflower Conference, ISA, Edirne, Turkey, 29 may-3 june 2016, 61-70.
- Masirevic S., Gulya T.-J., 1992. Sclerotinia and Phomopsis - two devastating sunflower pathogens. *Field Crops Research*, 30, 271-300.
- Moinard J., Eychenne N., 1998. Le Phomopsis. Guide "Grandes Cultures". Dossier support des Avertissements Agricoles routes et télécopiés. S.R.P.V. "Midi-Pyrénées".
- Muntanola-Cvetkovic M., Vukojevic J., and Mihaljcevic M., 1989. Pathohistology of sunflower stems attacked by *Diaporthe helianthi*. *Can. J. Bot.*, 67, 1119-1125.
- Naseri B., Davidson J.-A., Scott E.-S., 2009. Maturation of pseudothecia and discharge of ascospores of *Leptosphaeria maculans* on oilseed rape stubble. *European Journal of Plant Pathology*, 125, 4, 523-531
- Petrov M., Muntanola-Cvetkovic M., Mihaljcevic M., 1981. New findings on the disease of sunflower plants caused by *Phomopsis helianthi* Munt.-Cvet. et al. (*Diaporthe helianthi* Munt.-Cvet et al.). *Archives des Sciences Biologiques (Beograd)*, 33, 13-19.
- Salam M.-U., Khangura R.-K., Diggle A.-J. and Barbetti M.-J., 2003. Blackleg Sporacle: a model for predicting onset of pseudothecia maturity and seasonal ascospore showers in relation to blackleg of canola. *Phytopathology* 93 (9): 1073–81. doi:10.1094/PHYTO.2003.93.9.1073.
- Thompson S.-M., Tan Y.-P., Young A.-J., Neate S.-M., Aitken E.-A.-B., Shivas R.-G., 2011. Stem cankers on sunflower (*Helianthus annuus*) in Australia reveal a complex of pathogenic *Diaporthe* (*Phomopsis*) species. *Peersonia*, 27, 80-89.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.-W., 2006. *Working with dynamic crop models : evaluation, analysis, parametrization and applications*. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 462 p.