



HAL
open science

Une approche intégrée pour prendre en compte les effets de la variété, de la conduite et de l'environnement sur l'incidence et la sévérité des maladies de fin de cycle du tournesol

Emmanuelle Mestries, Myriam Desanlis, Jean-Noel J.-N. Aubertot, Philippe P. Debaeke

► To cite this version:

Emmanuelle Mestries, Myriam Desanlis, Jean-Noel J.-N. Aubertot, Philippe P. Debaeke. Une approche intégrée pour prendre en compte les effets de la variété, de la conduite et de l'environnement sur l'incidence et la sévérité des maladies de fin de cycle du tournesol. *Innovations Agronomiques*, 2015, 46, pp.75-93. 10.15454/1.4622672746905388E12 . hal-02630152

HAL Id: hal-02630152

<https://hal.inrae.fr/hal-02630152>

Submitted on 27 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Une approche intégrée pour prendre en compte les effets de la variété, de la conduite et de l'environnement sur l'incidence et la sévérité des maladies de fin de cycle du tournesol

Mestries E.¹, Desanlis M., Aubertot J.-N.², Debaeke P.²

¹ Terres Inovia (CETIOM)

² INRA, UMR AGIR, Centre INRA de Toulouse, 24 Chemin de Borde-Rouge, CS 52627, 31326 Castanet-Tolosan.

Correspondance : e.mestries@terresinovia.fr

Résumé

Le tournesol est une culture présentant de nombreux atouts agronomiques, industriels et environnementaux. Dans le contexte du plan Ecophyto, son indice de fréquence de traitement (IFT) faible lui offre une place de choix dans de nombreux systèmes de culture. Toutefois, sa compétitivité économique doit progresser et l'un des points-clés de cette progression réside dans la maîtrise des pressions biotiques subies par la culture. Le développement d'outils d'aide à la conception de systèmes de culture permettant de prendre en compte les interactions entre l'environnement (pression parasitaire locale, sol et climat), le système de culture *via* l'effet de l'interaction entre le travail du sol et la succession des cultures sur les endo-inocula et la conduite de culture (date de semis, fertilisation azotée,...), et le choix variétal est un moyen de contribuer à cet objectif. Deux approches de modélisation permettant de représenter ces interactions ont été mises en œuvre sur quatre champignons majeurs du complexe parasitaire du tournesol : le mildiou (*Plasmopara halstedii*), le phomopsis (*Diaporthe helianthi*), le phoma (*Leptosphaeria lindquistii*) et le sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*). Au-delà des connaissances acquises sur l'épidémiologie des maladies du tournesol et les effets des pratiques culturales sur l'état du couvert et l'expression des maladies, ces modèles permettront de représenter les interactions entre agents pathogènes du complexe parasitaire et de proposer aux sélectionneurs, aux chercheurs et aux ingénieurs et techniciens de développement des outils d'aide à la conception d'idéotypes variétaux adaptés et à la construction de stratégies de production intégrée.

Mots-clés : complexe parasitaire, conduite culturale, couplage modèle de culture – modèle épidémiologique, outil pour l'évaluation de stratégies de production intégrée, protection intégrée des cultures.

Abstract: Integrated approach to take into account the effect of variety, management and environment on incidence and severity of late cycle disease of sunflower

Sunflower is a crop with multiple agronomic, industrial and environmental benefits. With regard to the national action plan Écophyto, its low Treatment Frequency Index presents a major advantage in many crop rotations. However, its economic competitiveness has to be improved and one of the key points in order to do so is to control biotic stress. It is therefore necessary to develop tools to help designing sustainable cropping systems by valorizing interactions among the environment (local biotic stress, soil and climate); cropping system, such as the impacts of the interaction between soil tillage and crop on endo-inocula, crop management (e.g. sowing date, nitrogen fertilisation), and cultivar choice. Two modelling approaches were undertaken in order to represent these interactions for four major fungi on sunflower: downy mildew (*Plasmopara halstedii*), phomopsis (*Diaporthe helianthi*), phoma (*Leptosphaeria lindquistii*) and white mold (*Sclerotinia sclerotiorum*). Beyond the epidemiology of sunflower diseases and the impact of cropping practices on crop status and disease development, these models will represent interactions among pathogenic agents on sunflower. They will make it

possible: i) to help researchers and advisors to design sustainable sunflower-based cropping systems; ii) to propose breeders tools to help design ideotypes of cultivar adapted to integrated production strategies.

Keywords: sunflower disease complex, crop management, crop model and epidemiological model coupling, tool for the evaluation of strategies of integrated production, Integrated Pest Management.

Introduction

Le tournesol est depuis les années 80 une composante majeure des assolements du grand Sud-Ouest de la France (en particulier en Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes). Dans ces deux régions, le tournesol représente la 3^{ème} production après le blé tendre et le maïs.

Si elle présente des atouts reconnus sur les plans agronomique, environnemental, alimentaire et industriel, les progrès génétiques que la culture a connu ces 30 dernières années sont à ce jour mal valorisés et les rendements moyens nationaux ne progressent pas, stagnant entre 21 et 25 q.ha⁻¹.

Les principaux facteurs limitants de la production du tournesol sont liés aux pratiques culturales (difficultés d'implantation des peuplements, mauvais ajustement de la fertilisation azotée, absence d'irrigation), mais aussi à une montée en puissance des problèmes pathologiques et malherbologiques liés au retour fréquent de la culture dans la rotation.

Au niveau national, le complexe parasitaire du tournesol a évolué ces dernières années, avec la montée en puissance du phoma et du dessèchement précoce qui lui est associé, l'arrivée du verticillium qui s'est bien installé en particulier dans le Sud-Ouest, la recrudescence du mildiou depuis 2012, ainsi qu'un retour du phomopsis jusque dans la moitié Nord (Tableau 1). Ces évolutions sont bien sûr liées fortement au contexte climatique, mais aussi aux pratiques culturales et en particulier au choix variétal. En effet, après les questions de précocité et de qualité d'huile (profil linoléique ou oléique), celui-ci reste axé prioritairement sur le rendement et la variété « résistante à tout » n'existe pas, d'autant que d'autres problèmes parasitaires tels que l'orobanche (*Orobanche cumana*) sont déterminants dans certains secteurs.

Les avancées des sélectionneurs sur l'amélioration du profil de résistance des variétés face aux maladies ne sont ainsi toutefois pas toujours bien valorisées, que ce soit par un choix variétal non raisonné par rapport au risque ou par la non prise en compte de ce choix dans le raisonnement des autres méthodes de contrôle des maladies : les exemples du phomopsis et du mildiou en témoignent.

L'analyse de l'évolution des pratiques culturales pour la lutte contre le phomopsis est ainsi riche d'enseignements. En effet, sur 12 années d'enquête menées par le CETIOM depuis 1996 (environ 12 000 parcelles au total), on assiste à une baisse significative des surfaces traitées au cours du temps (Figure 1a). Celle-ci s'explique principalement par l'amélioration du comportement des variétés cultivées, avec l'apparition de variétés à bon et très bon comportement, qui ont peu à peu pris leur place sur le marché au détriment des variétés sensibles et très sensibles (Figure 1b).

En revanche, cette fréquence de traitement n'apparaît pas liée au risque épidémique (ex. 2001 année à fortes attaques, recrudescence des attaques en 2010 et 2011) et l'application du traitement fongicide (qui peut se faire en même temps que l'application de bore) ne semble pas raisonnée en fonction du choix variétal : le pourcentage de surfaces traitées par catégorie de comportement des variétés suit ainsi la même tendance au cours du temps, quel que soit le profil de la variété cultivée (Figure 1c).

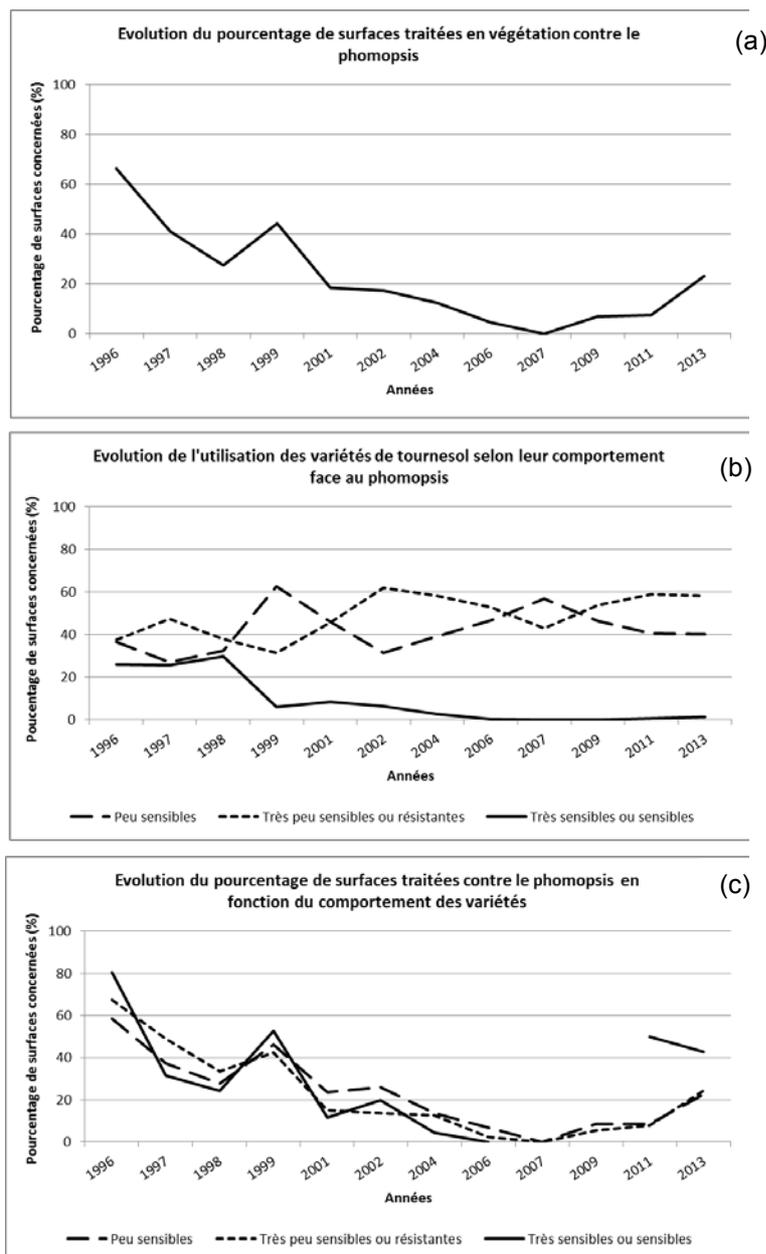


Figure 1 : Evolution de la mise en œuvre des méthodes de lutte génétique et chimique contre le phomopsis en France entre 1996 et 2013* (source : enquêtes « pratiques culturales » Terres Inovia). 2007 : enquête en Poitou-Charentes seulement, sur 115 parcelles.

Il en est de même en ce qui concerne la lutte fongicide contre le mildiou : entre 2006 et 2013, plus de 80% des semences de tournesol utilisées sur le territoire national sont traitées en moyenne chaque année d'après l'Union française des semenciers (UFS), avec la seule matière active autorisée sur le marché. Or, d'après l'enquête sur les pratiques culturales menée en 2013 par le CETIOM (Wagner, 2013), 31% des surfaces sont cultivés avec des variétés résistantes à au moins 6 des 9 races de mildiou reconnues officiellement sur le territoire, ne nécessitant pas de traitement de semences si leur profil est adapté au risque local. De plus, une alternance raisonnée des variétés sur la base de leur résistance génétique et sur le traitement de semences devrait permettre de réduire considérablement cette utilisation et de réduire les phénomènes de résistance observés chez le mildiou. La recrudescence des attaques de mildiou observée depuis 2012 sur le territoire s'explique (en plus des conditions climatiques favorables aux infections et des rotations trop courtes dans certaines régions)

clairement par la perte d'efficacité de ce traitement face à la race 714, race pour laquelle on observe 80% d'isolats résistants en 2014 (DGAL/SDQPV *et al.*, 2015) et face à laquelle 60% des surfaces ont été cultivées avec une variété sensible (ou sans information face à cette race de la part du semencier) en 2013.

Dans le contexte du plan Ecophyto, le tournesol a des atouts à faire valoir au sein des systèmes de culture. Il contribue à la diversification des systèmes de culture, en rompant les successions de cultures d'hiver. Avec un indice de fréquence de traitement (IFT) de 2,1 points, il fait partie, avec le maïs, des grandes cultures les moins consommatrices de produits phytosanitaires (Butault *et al.*, 2010) et permet d'améliorer l'IFT des assolements dans lesquels il s'insère. Pour cela, il doit impérativement améliorer sa compétitivité technico-économique auprès des producteurs, et il apparaît donc important de construire et conseiller des méthodes de gestion des risques biotiques complémentaires pour une stratégie de protection intégrée du tournesol adaptée à chaque situation. Pour y parvenir, il convient de maîtriser les stress biotiques et abiotiques (et leurs interactions) dans le cadre d'une production intégrée valorisant au mieux les interactions génotype-environnement-conduite et les interactions biologiques au sein de l'agroécosystème.

Les recherches sur les maladies du tournesol sont assez nombreuses et divers travaux ont notamment montré l'importance de la conduite de culture sur l'incidence et la gravité des principales maladies du tournesol (Gulya *et al.*, 1997 ; Mestries *et al.*, 2011 ; Debaeke *et al.*, 2014). Toutefois, certaines phases du cycle épidémique sont mal connues : par exemple, l'impact de la gestion des résidus de récolte sur la quantité d'inoculum primaire, mais aussi la réceptivité de la culture à la maladie selon son stade de développement. De même, l'appréciation de la nuisibilité des maladies pour le rendement et la qualité des graines mérite des approfondissements méthodologiques. Enfin, aucun travail ne prend en compte à ce jour l'ensemble du complexe parasitaire du tournesol et les interactions existant entre agents pathogènes. Une meilleure connaissance du fonctionnement de la culture et des variétés de tournesol couplée à l'épidémiologie des maladies est de nature à améliorer la prévision des interactions variété x milieu x conduite de culture.

Notre démarche a pour objectif de modéliser de manière intégrée les dimensions épidémiologiques des agents pathogènes du complexe parasitaire et les caractéristiques des variétés en relation avec la croissance et le développement de la culture (résultant des interactions entre les pratiques culturales et la situation de production) et la pression parasitaire locale. Les quatre agents pathogènes retenus dans ce travail (Tableau 1) permettent d'explorer une diversité de questions :

- pour les maladies aériennes telles que le phomopsis, le phoma et le sclérotinia sur capitule, quelle est la part respective de l'architecture, la précocité et la résistance génétique intrinsèque des variétés dans l'incidence et la sévérité des maladies ?
- comment modéliser les interactions entre maladies, par exemple entre phomopsis et phoma, le passage du premier sur tige pouvant être bloqué par les symptômes du second ?
- comment tenir compte du niveau d'endocyclisme des agents pathogènes ? Le niveau d'endocyclisme tel que défini par Aubertot et Robin (2013) résulte en effet de la combinaison de deux caractéristiques : la persistance de l'endo-inoculum dans la parcelle et sa capacité de dispersion. Un bioagresseur endocyclique se caractérise ainsi par un cycle biologique fortement inféodé à la parcelle et son développement est très dépendant de l'endo-inoculum. Dans le cas des maladies fongiques du tournesol, le mildiou apparaît ainsi comme fortement endocyclique, à l'opposé du phomopsis et du phoma. La gestion de ces deux types de maladies questionne respectivement l'échelle de la parcelle d'un côté et l'échelle paysagère de l'autre.
- peut-on modéliser l'impact du choix variétal sur la durabilité des résistances spécifiques et la durabilité des solutions fongicides (cas du mildiou) ?

Afin de représenter de manière intégrée le fonctionnement d'une variété de tournesol face au complexe parasitaire qui nous intéresse, deux voies de modélisation complémentaires ont été explorées :

- une voie mécaniste et dynamique, basée sur le couplage de modèles épidémiologiques au modèle de culture SUNFLO développé par Casadebaig *et al.* (2011). Cette voie exige de disposer de connaissances fines sur le cycle biologique des agents pathogènes et leurs interactions avec leur hôte (précocité, architecture et cinétique de mise en place du couvert foliaire, résistance génétique, ...) et leur environnement (climat, sol, pratiques culturales). Elle permet de simuler la nuisibilité de la maladie pour une situation donnée.

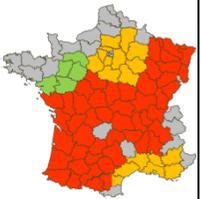
- une seconde voie qualitative, sans représentation fine des processus biologiques et donc moins exigeante en connaissances détaillées, mais mobilisant bibliographie et expertise, axée vers la seule prédiction des dégâts (les dommages ne sont pas considérés). Cette approche, proposée par Aubertot et Robin (2013) se base sur la plateforme IPSIM (Injury Profile SIMulator), pour développer des modèles agrégatifs qualitatifs. La démarche permet de modéliser les effets des pratiques agricoles (gestion de l'inoculum primaire, choix variétal, lutte fongicide,...) et de la situation de production (sol, climat et environnement de la parcelle) sur le risque de dégâts causés par un complexe de bioagresseurs (maladies, ravageurs, adventices).

Ces deux voies de modélisation permettent toutes deux de représenter les interactions entre les agents pathogènes composant le complexe parasitaire du tournesol et leur complémentarité permet d'aborder l'ensemble des questions posées précédemment.

L'approche IPSIM a été engagée pour le sclérotinia et le mildiou. La démarche de couplage « SUNFLO_Maladies » a été mise en œuvre pour deux maladies aériennes : le phomopsis et le phoma.

Ces deux approches ont pour objectif d'avancer dans la compréhension et la valorisation des interactions variété x environnement (biotique et abiotique) x conduite de culture. Les outils de conception et d'évaluation d'itinéraires techniques de production intégrée du tournesol qui en découleront seront utiles en amont aux sélectionneurs pour la recherche d'idéotypes variétaux adaptés, et en aval aux évaluateurs de variétés et aux prescripteurs pour l'amélioration de leurs préconisations.

Tableau 1 : Caractéristiques des quatre principales maladies du tournesol (d'après Desanlis, 2013 ; Bordat *et al.*, 2012 ; Chollet *et al.*, 2012 www.terresinovia.fr).

		Mildiou <i>Plasmopara halstedii</i>	Phomopsis <i>Phomopsis helianthi</i> / <i>Diaporthe helianthi</i>	Phoma <i>Phoma macodnaldii</i> / <i>Leptosphaeria</i> <i>lindquistii</i>	Sclérotinia <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>		
Type d'agent pathogène		biotrophe	nécotrophe	nécotrophe	nécotrophe		
Niveau d'endocyclisme		fort	Faible	faible	fort pour le sclérotinia collet (sclérotines dans le sol), intermédiaire pour le sclérotinia capitule (ascospores)		
Polycyclisme		oui	Non	non dans les conditions françaises	non		
Conservation de l'inoculum	Support	Résidus, sol, semences	Résidus	Résidus	Résidus, sol		
	Durée de survie	10 ans	Au moins 1 an	Au moins 3 ans	7 à 10 ans		
Origine de l'inoculum		Endo-inoculum majoritaire	Allo-inoculum	Allo-inoculum	Endo-inoculum majoritaire		
Occurrence		Printemps pluvieux	Tous les ans	Tous les ans	Tous les ans		
Répartition et fréquence	<ul style="list-style-type: none"> ■ Peu fréquente ■ Moyennement fréquente ■ Fréquente ■ Très fréquente ■ Département avec moins de 200 ha de tournesol en 2014 (Agreste, Nov 2014) 			Phoma tige 	Phoma collet et dessèchement précoce 	Sclérotinia collet 	Sclérotinia capitule 
		Déterminisme génétique de la résistance du tournesol	Résistance spécifique avec problèmes de contournement – résistance quantitative en cours d'exploration	Résistance quantitative oligogénique	Résistance quantitative polygénique – différente selon l'organe (tige, collet)		Résistance quantitative polygénique – différente selon l'organe (capitule, collet)
Lutte fongicide		Oui – traitement de semences mais phénomènes de résistance de l'agent pathogène	Oui – traitement en végétation commun aux deux champignons – conseil d'utilisation aujourd'hui ciblé sur le phomopsis car maladie la plus potentiellement nuisible		non		

1. La démarche adoptée

La première étape du travail a consisté à mettre en œuvre une démarche de modélisation conceptuelle pour orienter la recherche de données utiles au projet. Ciblée sur une approche dynamique pour le couplage avec le modèle de culture SUNFLO, le schéma conceptuel produit comporte 4 modules permettant de reproduire les principales étapes de l'interaction culture – champignon pathogène :

- 1) production d'inoculum primaire : prédiction de la quantité d'inoculum initial (allo-inoculum) et de la date de libération des ascospores,
- 2) pollution : prédiction de la quantité de spores interceptées par le couvert,
- 3) infection : prédiction de l'incidence de la maladie,
- 4) nuisibilité : prédiction de la perte de rendement et de teneur en huile (dommages) en fonction de la sévérité des symptômes (dégâts).

Suite à cela, l'analyse bibliographique, l'inventaire des données disponibles auprès des partenaires du projet et l'exploration des modèles épidémiologiques existants ont permis d'identifier plusieurs déficits de connaissances. Cette deuxième étape a alors donné lieu à la conception et la mise en place d'expérimentations en plein champ et en conditions contrôlées. Des réseaux de parcelles agricoles ont également été le support de différents travaux. Des expérimentations ont été dédiées à la validation de différents modules du modèle SUNFLO_Maladies. A travers cet ensemble d'expérimentations, différentes échelles ont été abordées : organe, plante, peuplement, paysage.

- En ce qui concerne la production d'inoculum primaire, les travaux ont porté principalement sur le phoma : maturation des pseudothèces, conditions climatiques favorables à l'émission des ascospores, effet du travail du sol sur la quantité d'inoculum primaire, températures cardinales de croissance du mycélium.
- En ce qui concerne la résistance génétique du tournesol, l'effort a porté sur l'analyse du déterminisme génétique de la résistance du tournesol face au dessèchement précoce dû au phoma et face au phoma sur tige.
- En ce qui concerne les interactions « état du couvert – incidence et sévérité des maladies », différentes expérimentations analytiques ont été mises en œuvre en serre et au champ, avec différents objectifs :
 - Evaluation de l'effet du stade phénologique de la plante sur la vitesse de propagation du phomopsis (serre),
 - Quantification des dommages causés par le phomopsis sur les feuilles de tournesol (serre),
 - Identification des conditions dans lesquelles se déroule une interaction entre phomopsis et phoma, en contrôlant les dates de contamination de la plante (serre et champ),
 - Impact du choix variétal et des pratiques culturales (fertilisation azotée, densité de semis et irrigation) sur l'incidence et la sévérité du phomopsis et du phoma, en lien avec le microclimat sous le couvert (champ).

Ces expérimentations ont permis d'explorer une gamme de sensibilité variétale aux maladies, couplée à une gamme d'architecture. Elles ont donné lieu à un suivi particulièrement fin des symptômes, site d'infection par site d'infection : date d'apparition, position des sites d'infection, vitesse de progression, identification des cas d'interaction phomopsis-phoma.

Les autres maladies initialement prévues dans le projet (mildiou et sclérotinia) ont été abordées en 2014, à travers la démarche de modélisation IPSIM. L'analyse de la littérature a permis de recenser

l'ensemble des connaissances disponibles sur les effets des pratiques culturales, du sol et du climat et de l'environnement de la parcelle sur l'incidence et la sévérité du mildiou et du sclérotinia sur capitule. Les experts français de ces deux maladies ont été sollicités pour définir la structure de l'arbre hiérarchique de chaque modèle. Une base de données a été créée à partir d'informations recueillies sur un réseau d'une quarantaine de parcelles agricoles dans le cadre d'un précédent projet pour l'évaluation de la qualité prédictive du modèle mildiou.

2. Résultats

2.1 Un schéma conceptuel du modèle « SUNFLO_Maladies »

Le modèle conceptuel de couplage entre le modèle SUNFLO et les modèles épidémiologiques du phomopsis et du phoma est présenté (Figure 2).

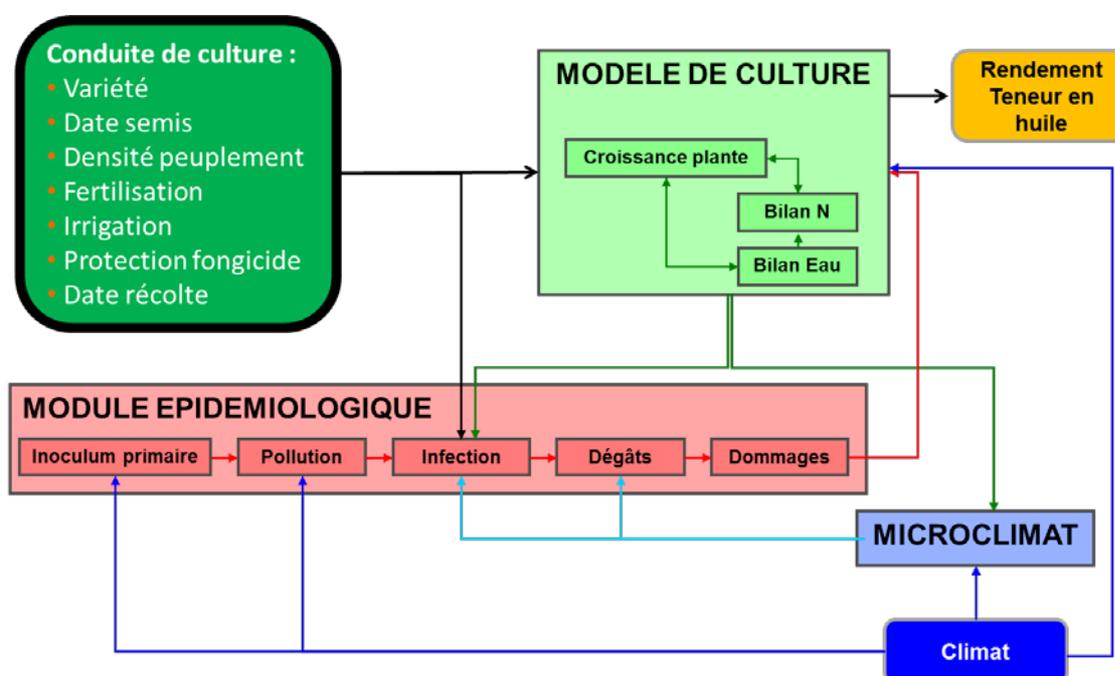


Figure 2 : Schéma conceptuel du couplage entre un modèle épidémiologique (en rose) et le modèle de culture SUNFLO (en vert) pour la construction du modèle dynamique SUNFLO_Maladies (Desanlis, 2013).

Le modèle de culture SUNFLO permet de représenter de manière dynamique, jour après jour, le fonctionnement de la culture de tournesol dans une situation donnée : son enracinement, la mise en place de sa surface foliaire et l'accumulation de sa biomasse aérienne. Le modèle simule le rendement parcellaire et la teneur en huile et fournit plusieurs indicateurs de stress subis par la culture (stress hydrique et azoté). Quatre types de caractères permettent de tenir compte des différences entre variétés : leur phénologie, leur architecture, leur tolérance au stress hydrique et leur capacité d'allocation des produits de la photosynthèse vers les graines (indice de récolte, teneur en huile potentielle).

Le modèle épidémiologique représente les principales phases du cycle épidémiologique de champignons tels que le phoma et le phomopsis, tous deux monocycliques : la production d'inoculum primaire (allo-inoculum) à partir des résidus de culture infectés, la pollution puis l'infection des organes de la plante-hôte, le développement des symptômes (dégâts) puis des dommages (pertes de rendement et de qualité).

Les deux premières phases du processus épidémique ont lieu principalement à l'extérieur de la parcelle (allo-inoculum) et sont sous l'influence du climat. Les interactions entre la plante-hôte et les agents pathogènes débutent à partir de la phase de pollution et sont sous l'influence de l'état du couvert et du microclimat dans le couvert, lui-même sous l'influence du climat. Ainsi, le microclimat est déterminé par le climat et les états du couvert et va générer ou non (en plus de la résistance génétique intrinsèque de la variété) des conditions favorables ou défavorables au développement des champignons. En plus de son action sur les états du couvert, la conduite de culture peut influencer directement les épidémies en cas d'application de traitement fongicide. Enfin, les dommages vont impacter le fonctionnement de la plante (réduction de la durée de surface foliaire, rupture d'alimentation). Le modèle simulera alors un rendement et une teneur en huile en présence de maladies.

La Figure 3 est une représentation plus détaillée de ce schéma conceptuel. Les liens avec le modèle SUNFLO figurent dans la partie entourée en pointillés ; ils concernent le LAI (*Leaf Area Index*, indice foliaire en français) au moment de la phase de pollution puis au moment de l'expression des dommages (réduction de la durée de surface foliaire), le stade phénologique de la variété, qui intervient dans la réceptivité des tissus lors de la phase de pollution et dans la vitesse de progression des dégâts, et enfin l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE), perturbée par l'apparition des symptômes nuisibles. Les différents processus des phases de maturation et de libération de l'inoculum primaire seront représentés par le couplage avec le modèle de prévision du risque épidémique Asphodel. Enfin, l'effet du climat et de la conduite de culture sur le microclimat sera modélisé selon l'approche dynamique développée dans STICS (Brisson *et al.*, 2008).

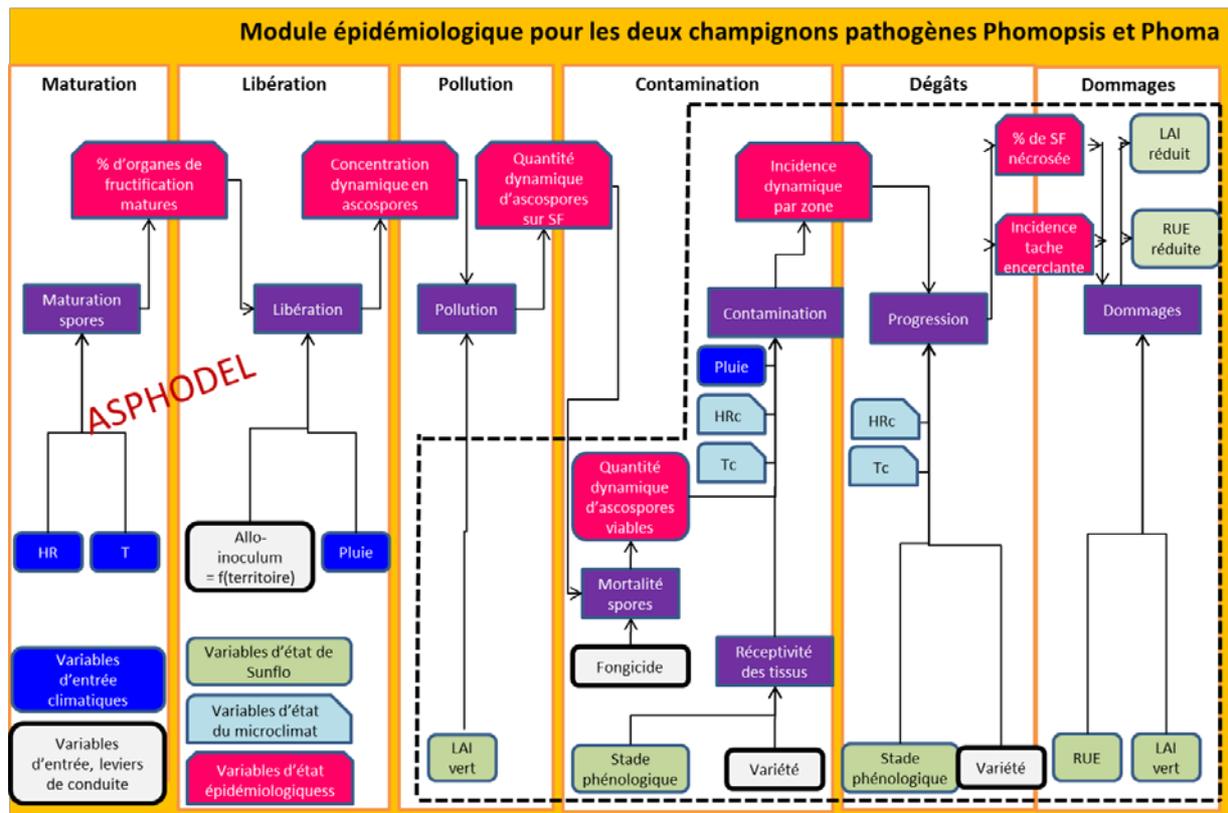


Figure 3 : Schéma détaillé du modèle conceptuel SUNFLO_Maladies pour phomopsis et phoma (Desanlis, 2013).

2.2 De nouvelles connaissances sur les deux pathosystèmes

2.2.1 Un inoculum primaire de phoma rarement limitant

Les premiers périthèces mûrs apparaissent dès février, bien avant le semis du tournesol, et leur proportion s'accroît jusqu'à la période de floraison où la totalité d'entre eux a le plus souvent atteint le stade de maturité. Mi-mai, plus de 80% des périthèces sont généralement mûrs permettant ainsi des émissions significatives d'ascospores pouvant être à l'origine de contaminations précoces des tournesols. Cette cinétique de maturation apparaît similaire selon que les résidus sont placés dans une culture de blé (cas correspondant à la réalité agricole dans un grand nombre de situations) ou sous un couvert de tournesol (dans une optique de contamination semi-naturelle renforcée pour les expérimentations). Les conditions climatiques favorables aux émissions des ascospores sont assez peu exigeantes : de faibles précipitations suffisent pour initier les projections et l'humidité relative de l'air après une période pluvieuse permet la poursuite de ces projections. Les émissions d'ascospores de phoma suivent une dynamique très proche de celle du phomopsis et la première tentative d'utilisation du modèle Asphodel (construit pour la prédiction de la maturation des périthèces de phomopsis et utilisé pour le Bulletin de Santé du Végétal dans différentes régions) pour le phoma est encourageante. Le modèle reproduit bien les tendances des périodes de maturation des pseudothèces ; son paramétrage serait à tester sur un jeu de données plus large, qui n'est pas disponible aujourd'hui.

Enfin, les techniques de travail superficiel ne semblent pas réduire le potentiel d'inoculum pour l'année suivante par rapport au semis direct. Sur deux campagnes favorables au phoma sur tige, le réservoir d'inoculum est estimé à en moyenne 60 000 pseudothèces par m² de surface au sol. Bien que le dispositif mis en place pour cette quantification ne soit pas idéal, c'est la première fois que l'inoculum primaire de phoma est ainsi quantifié en parcelles agricoles et le conseil de Terres Inovia de broyage et d'enfouissement des résidus est conforté.

2.2.2 La résistance génétique des variétés : un rôle majeur dans l'expression du phomopsis et du phoma

Phomopsis

Le déterminisme génétique de la résistance du tournesol au phomopsis est de type quantitatif oligogénique. Le comportement d'une variété tel que caractérisé lors de l'évaluation variétale (de « résistant » à « sensible ») porte sur le pourcentage de plantes porteuses d'une tache encerclante sur tige (le symptôme le plus nuisible de la maladie), en absence de phoma. D'après Bertrand et Tourvieille (1987), il est probable que plusieurs mécanismes de résistance soient en jeu dans l'expression de la maladie, correspondant aux différentes étapes du processus épidémiologique : l'installation du champignon sur les feuilles, la vitesse de progression du champignon dans les tissus de la feuille vers la tige, la colonisation de la tige.

L'étude de différentes variétés dans ce projet confirme ces hypothèses : le nombre total de symptômes sur feuilles varie d'un facteur 4 selon les variétés et n'est pas proportionnel au nombre de feuilles de la variété (Tableau 2).

Tableau 2 : Classement des variétés pour le nombre de symptômes de phomopsis sur feuilles sur l'expérimentation conduite au champ en 2011, toutes conduites de culture confondues (Desanlis *et al.*, 2013).

Variété (classement CETIOM)	Nombre moyen de feuilles par variété	Symptômes sur feuilles (nombre de symptômes par plante)		
		1 ^{ère} cohorte	2 ^{ème} cohorte	Total
ES Paulina (TPS)	30,8 b	0,3 b	2,3 c	2,6 c
Kerbel (PS)	29,5 c	0,7 b	3,2 c	3,9 bc
LG5451HO CL (PS/TPS)	26,9 e	0,5 b	4,7 b	5,2 b
NK Ferti (TPS)	28,4 d	1,0 b	9,6 a	10,6 a
Sikllos CL (S)	33,8 a	1,5 a	9,0 a	10,5 a

Dans chaque colonne, les valeurs moyennes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Kruskal-Wallis au seuil de 5%. S=sensible, PS = peu sensible, TPS = très peu sensible.

Les vitesses de progression du phomopsis sur feuille et d'encerclement de la tige sont fonction du génotype : 1,07 mm °C⁻¹.j⁻¹ sur feuille pour un génotype sensible contre 0,88 mm °C⁻¹.j⁻¹ pour un génotype à bon comportement, 1,56 mm.j⁻¹ sur tige pour un génotype sensible contre 0,90 mm.j⁻¹ pour un génotype à bon comportement (base 12°C). Ces vitesses sont liées à la résistance variétale intrinsèque à la plante.

Avec la gamme de comportement face au phomopsis des variétés testées, il apparaît que l'effet de la variété à travers sa résistance intrinsèque à la maladie prédomine sur l'effet de la conduite de culture. Un génotype sensible montre ainsi plus de symptômes sur feuilles, avec une vitesse de progression du mycélium dans les tissus plus importante, ce qui augmente la proportion de réussite du passage du phomopsis sur tige puis celle de taches encercleantes. Les différences d'architecture des variétés explorées (nombre de feuilles, longueur des feuilles, diamètre de tige) n'expliquent pas la variabilité observée dans l'expression de la maladie, la conduite de culture ayant un effet plus déterminant sur l'état du couvert et le microclimat sous le couvert.

Phoma

De nombreux travaux antérieurs avaient déjà montré le caractère héritable et quantitatif de la résistance du tournesol face au phoma au stade plantule (Bordat *et al.*, 2011). Ce projet a été l'occasion de travailler cette résistance sur plantes adultes et a permis de mettre en évidence :

- une variabilité génétique importante au sein d'une vingtaine de lignées de la core-collection INRA pour la résistance au dessèchement précoce,
- le caractère polygénique de cette résistance,
- un déterminisme génétique de la résistance aux attaques de phoma au collet et au dessèchement précoce différent de celui de la résistance aux attaques de phoma sur tige.

Ces deux types d'attaque doivent donc (comme les différents types d'attaque du Sclerotinia sur tournesol) être considérés par les sélectionneurs et les évaluateurs de variétés comme des maladies différentes.

L'expérimentation conduite au champ en 2011 a permis de confirmer qu'il existe un effet variété significatif pour le nombre de nœuds foliaires atteints par le phoma, toutes conduites de culture confondues. Cette variabilité pour l'incidence du phoma sur tige n'est pas corrélée avec celle pour le phomopsis sur feuilles (Figure 4).

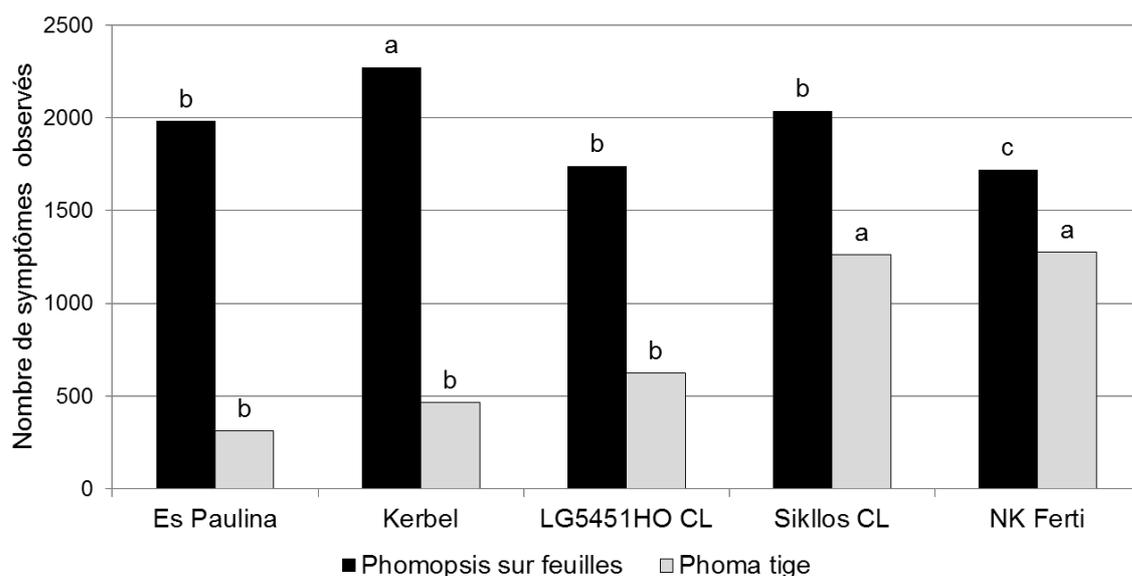


Figure 4 : Nombre de symptômes de phomopsis sur feuilles et de phoma sur tige observés sur 600 plantes au champ en 2011 selon les variétés, toutes modalités de conduite de culture confondues.

Ces différences entre variétés s'expliquent par la hauteur des symptômes de phoma sur la tige, l'effet variété ne s'exprimant qu'au-delà de la 12^{ème} feuille, c'est-à-dire dans la partie supérieure du couvert (moitié ou deux tiers supérieurs).

Comme pour le phomopsis, il n'a pas été possible d'établir de lien entre l'incidence du phoma sur tige et différents paramètres de l'architecture des variétés : hauteur, nombre de feuilles, volume des augets à l'insertion du pétiole sur la tige.

De même, les différences entre variétés face au phoma sur tige observées sur l'incidence et la progression de la maladie ne sont pas liées à la précocité à floraison des variétés (toutes variétés étant de même précocité) ou de réceptivité des tissus. Elles apparaissent donc le résultat de différences dans le niveau intrinsèque de résistance des variétés. Un effet génotype significatif a en particulier été mis en évidence pour la vitesse de progression des nécroses sur tige, avec une gamme de $0,13 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}\text{j}^{-1}$ pour NK Ferti à $0,04 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}\text{j}^{-1}$ pour Sikllos CL (base 5°C).

En ce qui concerne le phoma au collet, aucune différence entre variété n'a été observée ni pour le pourcentage de plantes atteintes, ni pour la vitesse de progression de la nécrose autour du collet sur le set de 5 variétés testées au champ en 2011.

2.2.3 Des effets forts de la conduite de culture et du microclimat sur phomopsis et phoma

En ce qui concerne le phoma, la fenêtre de contamination possible suite à une émission d'ascospores est fixée à 10 jours en lien avec le comportement du phomopsis (durée de vie des ascospores). Le délai d'incubation dépend du stade phénologique de la plante et est exprimé en degrés.jours : 360°C.j en début de cycle, 180°C.j à F1 (base $4,8^\circ\text{C}$). Les contaminations naturelles suivent une progression acropète, du bas vers le haut de la tige (Figure 5).

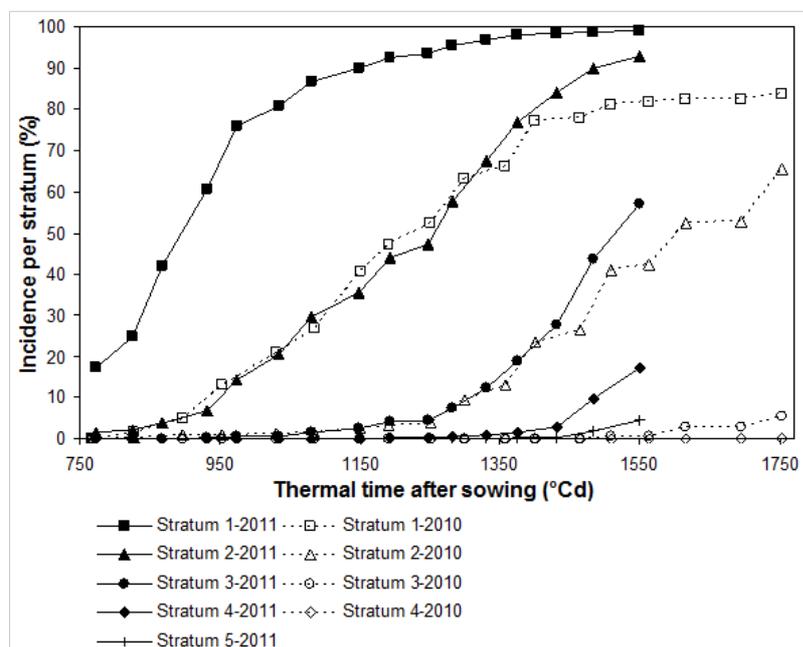


Figure 5 : Dynamique de l'incidence du phoma sur tige par strate d'étages foliaires (strate 1 : feuilles 1 à 6 à partir du bas de la plante ; strate 5 : à partir de la 25^{ème} feuille) en 2010 et 2011, toutes variétés et conduites de culture confondues (Desanlis, 2013).

Les symptômes « montent » plus ou moins haut sur la plante selon le climat de l'année, la conduite de culture et le génotype considéré. Une hypothèse explicative de ce phénomène est que le temps de latence serait différent selon la strate attaquée. Plus la conduite de culture est favorable, plus le nombre de nœuds atteints est élevé. La sévérité des attaques dépend du microclimat (température et humidité relative) et de l'état de développement du couvert (LAI). Enfin, la vitesse de progression du symptôme dépend du statut azoté de la plante jusqu'à la phase de remplissage. L'ensemble de ces relations est synthétisé sur la Figure 6.

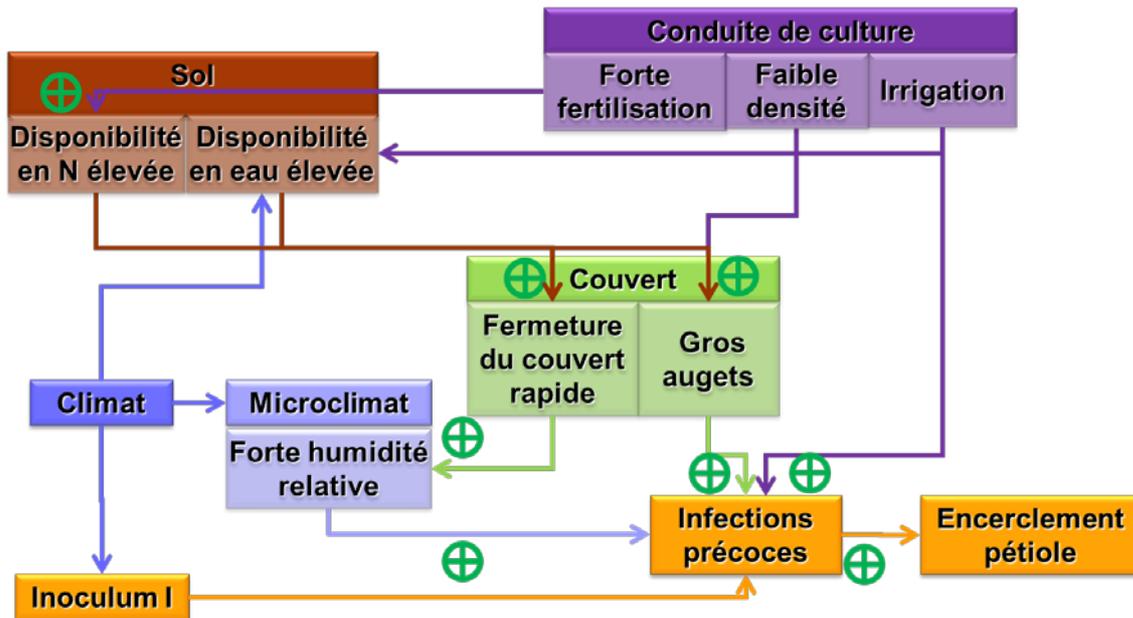


Figure 6 : Représentation schématique des effets du climat, du microclimat et de la conduite de culture sur l'incidence et la sévérité des attaques de phoma sur tige (Desanlis, 2013).

Pour le phomopsis, en situations climatiques limitantes, le microclimat (essentiellement l'humidité relative) détermine l'occurrence et la localisation de l'infection. Il interagit avec la surface foliaire verte lorsque la sénescence débute. La vitesse de progression est indépendante du stade phénologique de la plante. Au champ, elle varie de $0,99 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ sur les plantes carencées en azote à $1,26 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ sur les plantes bien alimentées en azote (base 12°C). Or, en serre, le statut azoté de la feuille (caractérisé par la teneur en chlorophylle) n'influe pas sur la vitesse de progression du champignon dans la plante, ce qui suggère qu'au champ cet effet est lié au microclimat créé dans ces conditions de conduite de culture. On retrouve les mêmes ordres de grandeur en serre que dans l'expérimentation au champ.

Le passage de la nécrose de la feuille sur la tige ne dépend que de la distance à parcourir par le symptôme et des événements venant interférer :

- la survenue d'une séquence de jours où la température létale pour le champignon survient alors que celui-ci n'a pas atteint le pétiole,
- la survenue de la sénescence de la feuille infectée alors que le champignon n'a pas atteint le pétiole,
- la présence de phoma implanté depuis au moins 10 jours à l'insertion du pétiole sur la tige.

Le diamètre de tige, plus fortement déterminé par la densité du peuplement que par la variété, détermine le temps nécessaire pour que le symptôme encercle la tige : ainsi, 8 mm de diamètre de tige supplémentaires augmentent la durée d'encerclement de 3 à 6 jours.

L'ensemble de ces relations est synthétisé sur la Figure 7.

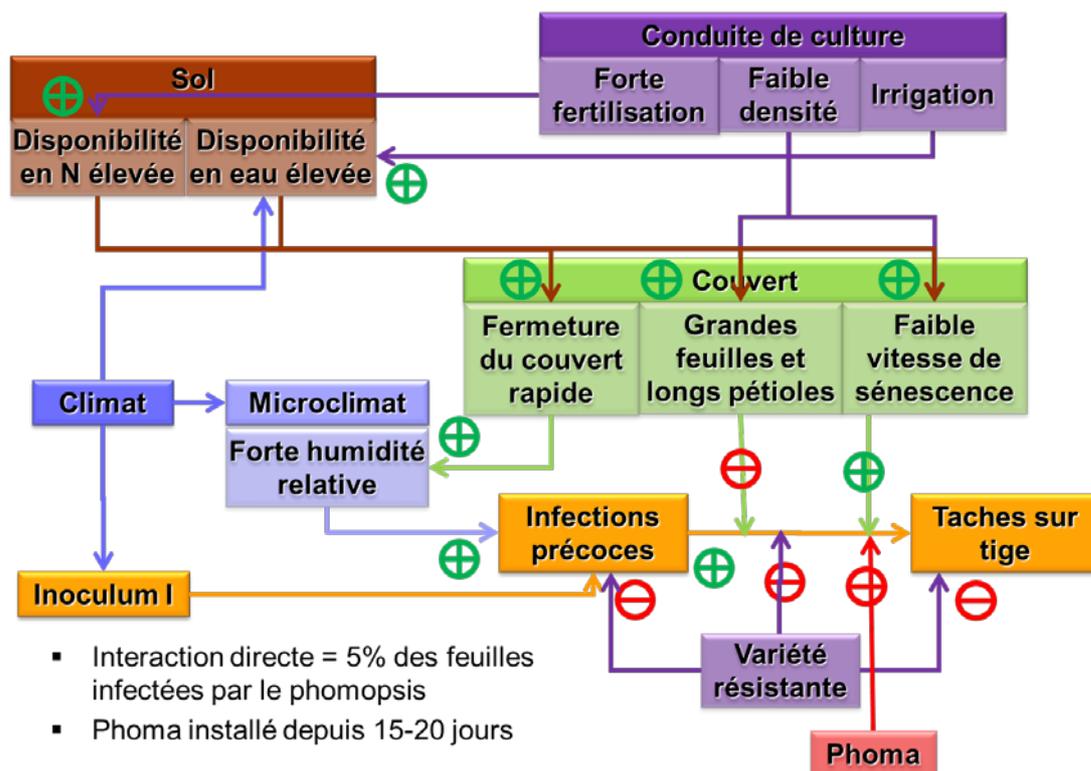


Figure 7 : Représentation schématique des effets du climat, du microclimat et de la conduite de culture sur l'incidence et la sévérité des attaques de phomopsis (Desanlis, 2013).

2.2.4 Les interactions phomopsis-phoma mieux caractérisées

L'interaction entre les deux champignons se manifeste sur la tige : le phoma, qui s'installe sur le pétiole ou le plus souvent directement à l'insertion du pétiole sur la tige, peut en effet bloquer le passage du phomopsis, qui lui s'installe d'abord sur la feuille. La compétition entre phomopsis et phoma pour les sites d'infection est la plus importante sur les feuilles-pétioles des strates 2 et 3 (en bas de la plante) et le phoma doit être installé depuis 15 à 20 jours avant l'arrivée du phomopsis. Sur l'expérimentation au champ conduite en 2011, en conditions d'infection naturelles pour le phoma et semi-naturelles pour le phomopsis (apport de résidus infectés), ces interactions ont concerné 5% des sites d'infection observés (Figure 8). La conduite de culture favorisant le plus l'apparition de cette interaction est une conduite riche en azote avec une densité de peuplement faible (D1-N150). Cette conduite favorise les attaques précoces des deux champignons. D'un côté, les augets profonds favorisent l'installation du phoma sur tige ; de l'autre, en faible densité, la distance que doit parcourir le phomopsis pour atteindre la tige est plus longue qu'en forte densité.

2.3 La construction du modèle couplé SUNFLO_Maladies

La construction du modèle couplé SUNFLO_Maladies sera basée sur un formalisme mobilisant un ensemble d'équations dynamiques permettant de représenter les différentes étapes processus épidémiologique en interaction avec les variables du modèle SUNFLO. Pour les deux maladies, la pression parasitaire environnante (allo-inoculum) sera évaluée à l'aide d'une table de niveau de risque permettant de positionner la situation initiale en fonction de la situation géographique et de l'année climatique qui vient de s'écouler ; les bilans de campagne du Bulletin de Santé du Végétal seront valorisés. La prévision des émissions de spores contaminantes sera assurée par le modèle Asphodel, déjà évalué pour le phomopsis et en cours d'évaluation pour le phoma. Le couplage proprement dit avec le modèle SUNFLO débute à la phase de pollution. Pour le phoma, ce couplage se fait à deux moments-clés : SUNFLO fournit un LAI au module acropète de progression des attaques sur tige, qui

fournit à son tour une incidence à SUNFLO. La nuisibilité de la maladie est ensuite représentée dans SUNFLO par la sénescence accélérée des feuilles. Le module représentant la progression acropète des symptômes sur tige prend en compte la dynamique de LAI et fait appel à des variables climatiques facilement accessibles (température et pluviométrie). Il dispose d'un sous-module permettant de prendre en compte l'application d'un traitement fongicide.

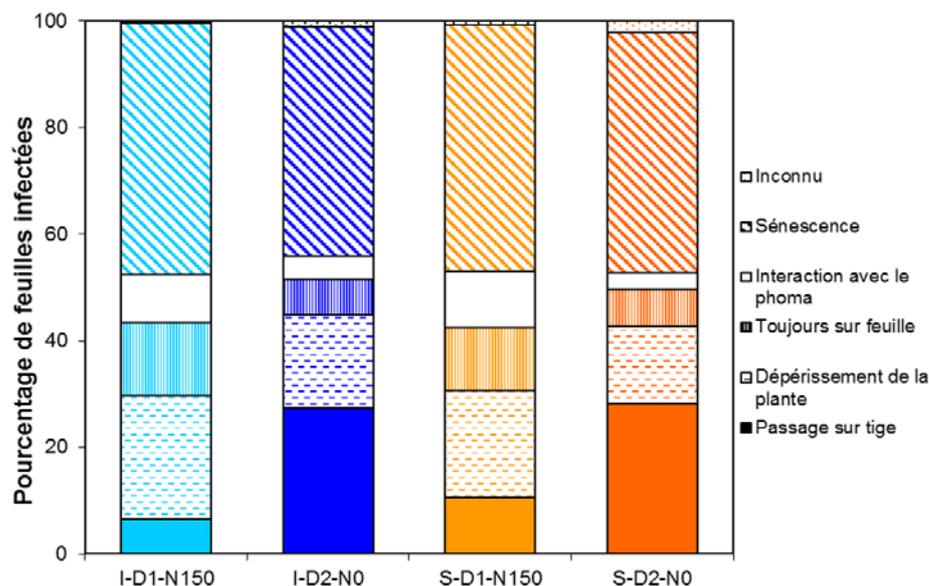


Figure 8 : Devenir des symptômes de phomopsis sur feuille sur l'expérimentation conduite au champ en 2011 pour quatre conduites de culture, toutes variétés confondues (I=irrigué ; S= sec ; D1=3,5 plantes m⁻² ; D2=7 plantes m⁻² ; N0 = 0 kg N ha⁻¹ ; N150 = 150 kg N ha⁻¹ ; Desanlis *et al.*, 2013).

Pour le phomopsis, le couplage sera plus fin : il nécessite de tenir compte à la fois du LAI mais aussi de la distribution des feuilles dans le couvert (architecture de la surface foliaire) et du microclimat sous le couvert. La densité de peuplement doit également être prise en compte, pour son effet sur le diamètre de tige. Les interactions entre modèle épidémiologique et modèle de culture sont ici plus complexes à gérer que pour le phoma.

Enfin, les dynamiques épidémiques du phomopsis et du phoma pouvant être simulées en parallèle, les interactions phomopsis / phoma seront représentées.

En ce qui concerne la prise en compte des variétés, un nouveau paramètre variétal sera intégré afin de prendre en compte leur niveau de résistance face au phomopsis : compris entre 0 et 1 (1 correspondant à une variété très sensible), il agira comme un facteur de réduction du taux d'infection potentiel. Pour le phoma, même si des protocoles expérimentaux ont été développés (Bordat *et al.*, 2011), la lourdeur de leur mise en place fait que l'on ne dispose pas à l'heure actuelle d'une évaluation des variétés face au phoma tige et au dessèchement précoce. L'effet « résistance variétale » ne pourra donc pas être pris en compte dans le modèle.

2.4 La construction du modèle IPSIM

Les deux premiers modèles construits portent sur le mildiou et le sclérotinia. Leurs variables de sortie sont l'incidence des deux maladies. Le modèle IPSIM_Mildiou, dont la structure est présentée sur la Figure 9, a fait l'objet d'une première évaluation : celle-ci a mis en exergue plusieurs points à améliorer, qui concernent le calage des règles d'agrégation des attributs et le niveau des poids des différentes pratiques culturales influençant le risque maladie. Ce modèle a été l'occasion de construire un raisonnement pour la prise en compte du choix variétal dans la gestion de la durabilité des résistances

spécifiques du tournesol à cette maladie, question qu'il n'était pas nécessaire d'aborder dans le modèle SUNFLO_Maladies phomopsis et phoma.

Attribute	Scale
Incidence du mildiou	Très élevée [30-100%]; Elevée]10-30%[; Faible]3-10%[; Nulle ou très faible [0-3%]
Pratiques culturales	Très favorable; Favorable; Moyennement favorable; Défavorable
Contrôle cultural	Favorable; Moyennement favorable; Défavorable
Gestion de l'inoculum primaire	Favorable; Moyennement favorable; Défavorable
Rotation du tournesol	To-Cer-To ; To-Cer-Cer-To
Travail du sol après l'antécédent	Semis direct; Travail superficiel; Labour
Travail du sol après le précédent	Semis direct; Travail superficiel; Labour
Esquive	Favorable; Défavorable
Date de semis	Favorable; Défavorable
Contrôle génétique	Favorable; Moyennement favorable; Défavorable
Choix variétal dans la succession	Non adapté au rique; Adapté au risque
Certification des semences	Non certifiées; Certifiées
Contrôle chimique	Inefficace; Moyen; Efficace
Traitement de semences	Absence; Mefénoxam (metalaxyl-M); Autre antimildiou
Efficacité du traitement des semences	Faible; Moyenne; Forte
Sol et Climat	Favorable; Moyennement Favorable; Défavorable
Sol	Favorable; Moyennement favorable; Défavorable
Type du sol	Oui; Non
Topographie de la parcelle	Fond de vallée; Plateau ou coteau
Climat	Favorable; Défavorable
Climat printanier	Favorable (> 200 mm); Défavorable (< 200 mm)
Environnement de la parcelle	Favorable; Défavorable
Source d'inoculum adjacente	Oui; Non

Figure 9 : Structure générale et échelles des attributs du modèle IPSIM_Mildiou.

Cette approche se poursuivra avec reprise du modèle mildiou, évaluation du modèle sclérotinia, développement des modèles phomopsis et phoma et modélisation des interactions entre maladies.

Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de :

- synthétiser et partager les connaissances sur les effets des pratiques culturales sur le complexe parasitaire du tournesol (mildiou, sclérotinia, phomopsis et phoma),
- développer des avancées méthodologiques, par exemple pour la quantification de l'inoculum primaire de phoma sur les résidus de culture,
- acquérir des connaissances nouvelles sur l'épidémiologie du phoma (notamment température létale, conditions favorables à l'émission des ascospores),
- proposer un modèle conceptuel de couplage du modèle de culture SUNFLO à des modèles épidémiologiques,
- formaliser une chaîne d'équations biologiques permettant ce couplage pour deux maladies en interactions : le phomopsis (*Phomopsis helianthi*) et le phoma (*Phoma macdonaldii*),
- analyser le déterminisme génétique de la résistance du tournesol au phoma, et montrer que la résistance au dessèchement précoce est différente de la résistance aux attaques de phoma sur tige,
- initier la démarche de modélisation IPSIM (Injury Profile SIMulator) sur le mildiou et le sclérotinia du capitule.

Le travail de couplage SUNFLO_Maladies et d'implémentation sur la plateforme de modélisation RECORD est actuellement en cours ; la démarche de modélisation IPSIM se poursuit sur phomopsis en phoma (tige et collet-dessèchement précoce).

Les deux voies de modélisation choisies se complètent : la construction des modèles mécanistes SUNFLO_Maladies phomopsis et phoma a ainsi permis de produire des connaissances utiles à la conception des modèles IPSIM pour ces deux maladies telles que les seuils de LAI à différents stades phénologiques favorables ou défavorables aux infections. Réciproquement, la démarche IPSIM permet

d'intégrer des éléments non pris en compte dans SUNFLO_Maladies. De plus, ces deux modèles font appel au modèle SUNFLO pour prédire le niveau de LAI en fonction des pratiques culturales (date et densité de semis, reliquats et fertilisation azotée, irrigation), du sol (profond ou superficiel) et du climat (année sèche ou humide pour chaque grande phase du cycle). Leurs qualités de prédiction respectives pourront être caractérisées en parallèle sur des jeux de données indépendants.

De même, les variables de sortie de SUNFLO_Maladies sont le rendement et la teneur en huile en présence de maladie, nuisibilité que ne peut prédire IPSIM_Sunflower. En revanche, on peut imaginer une variété de variables de sortie pour IPSIM_Sunflower, autres que la simple incidence de la maladie : une combinaison incidence et sévérité (par exemple pour le phoma sur tige : % de plantes avec taches en-dessous ou au-delà du 1/3 du couvert), la quantité d'inoculum primaire, l'apparition d'une nouvelle race de mildiou,...

Enfin, ces deux types de modèles permettront de développer des outils d'aide à la conception de stratégies de protection/production intégrée accessibles à des utilisateurs différents : plutôt des chercheurs et des ingénieurs chargés d'études pour SUNFLO_Maladies, avec un outil plus fin et d'utilisation moins aisée qu'IPSIM_Sunflower, ce dernier étant plus facilement accessible à des ingénieurs et techniciens du développement et présentant un intérêt pédagogique direct.

L'évaluation du comportement des variétés face aux maladies est aujourd'hui réalisée dans des conditions de contaminations naturelles renforcées (apport de résidus infectés ou choix de parcelles très infestées), avec un ensemble de pratiques culturales (date de semis, densité peuplement, fertilisation azotée et irrigation) créant des conditions très favorables à l'agent pathogène (phomopsis, sclérotinia, verticillium). Seule la résistance intrinsèque des variétés est accessible dans ce type de dispositif, les effets de l'architecture des plantes (pour les maladies aériennes) étant probablement « gommés » par ces conditions très favorables à la maladie. Ce type d'évaluation, aujourd'hui satisfaisant pour le conseil, manque toutefois pour le phoma et ne permet pas toujours de prévoir le risque de pertes de rendement en situations réelles de production, par exemple en cas d'attaques de phomopsis sur feuilles comme en 2014 dans le Lauragais : quels seront la vitesse de progression du champignon et le risque de passage sur tige sur telle variété en fonction de la hauteur des infections dans le couvert et du climat à venir ? Un modèle mécaniste détaillé tel que SUNFLO_Maladies prenant en compte l'architecture du couvert et les paramètres variétaux d'architecture (exemple longueur des feuilles) permettrait de mieux répondre à ce type de question.

Si le progrès variétal se poursuit pour le rendement (il est estimé à 0,25 q ha⁻¹ an⁻¹ entre 1991 et 2011 dans les essais post-inscription du CETIOM ; Jouffret *et al.*, 2011), il a marqué le pas pour la résistance aux maladies ces dernières années, hormis pour le mildiou pour lequel les gènes de résistance spécifique utilisés se sont diversifiés (Vear et Muller, 2011). La proportion de variétés à bon comportement face au phomopsis (très peu sensibles ou résistantes) et au sclérotinia du capitule (peu sensibles) parmi les variétés évaluées par le CETIOM en post-inscription depuis 2000 illustre cela (Figure 10).

Comme le soulignent Vear et Muller (2011) à propos du dessèchement précoce dû au phoma, favorisé par la non-gestion des résidus infectés dans l'environnement et un stress hydrique post-floraison, la question posée n'est plus celle de la sélection « pour le rendement » mais de la sélection « pour le rendement en absence de labour et en conditions de sécheresse ». Or, cette question devient de plus en plus cruciale avec la « mondialisation » de la sélection : les semenciers ne travaillent plus aujourd'hui à l'échelle d'un pays mais pour un marché beaucoup plus large. Ainsi, Terres Inovia évalue de plus en plus de variétés issues du Catalogue européen, en moyenne 25% entre 2000 et 2008, plus de 40% entre 2009 et 2014 et voit « réapparaître », parmi les variétés commercialisées, inscrites aux catalogues français et d'autres pays européens, des variétés à risque (Figure 11) : 7% des variétés commercialisées depuis 2010 en France sont ainsi classées sensibles au phomopsis contre 0 à 3% entre 1996 et 2009.

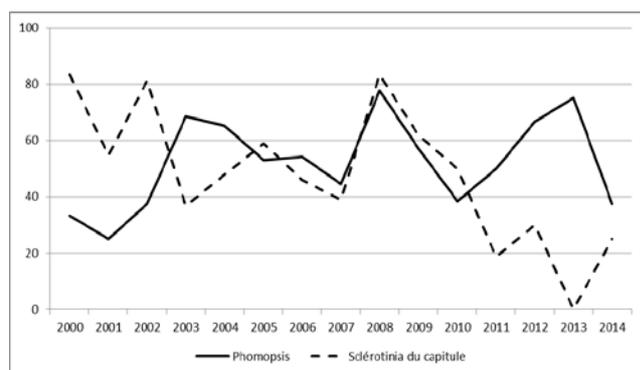


Figure 10 : Evolution du pourcentage de variétés à bon comportement face au phomopsis et au sclérotinia du capitule évaluées en post-inscription au CETIOM entre 2000 et 2014 (variétés issues des Catalogues français et européen ; source : Terres Inovia).

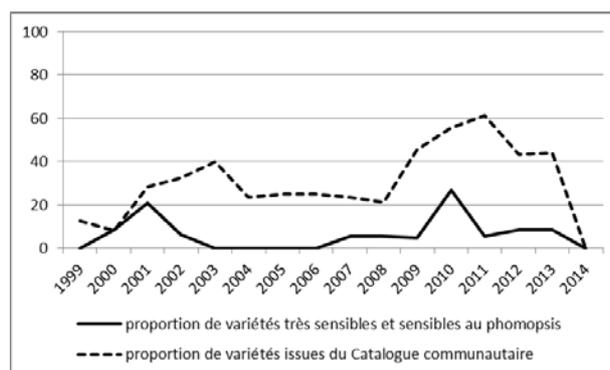


Figure 11 : Evolution de la proportion de variétés de tournesol très sensibles et sensibles au phomopsis parmi les variétés évaluées en post-inscription par le CETIOM entre 1999 et 2014 ; parallèle avec la proportion de variétés issues du Catalogue communautaire (source : Terres Inovia).

A l'opposé, ce changement d'échelle est une source d'innovations, puisqu'elle permet aux sélectionneurs d'avancer sur des questions cruciales dans d'autres pays producteurs de tournesol tels que la résistance à l'orobanche cumana pour l'Espagne et les pays de l'Est, par exemple. La diffusion de variétés « pas résistantes à tout » n'est pas problématique en soi, à partir du moment où leur utilisation est raisonnée, c'est-à-dire hors zones à risque ou associée à des pratiques culturales minimisant le risque : allongement de la rotation, gestion des résidus et raisonnement des pratiques culturales. On voit donc ici toute l'importance de disposer d'outils d'aide à la conception de stratégies de production intégrée pour accompagner au mieux les sélectionneurs et les producteurs dans leurs choix et valoriser le progrès génétique de cette espèce.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'UMT Tournesol, dans le cadre des projets CASDAR 10APPIT n°1015 et PROMOSOL « Intégration des contraintes biotiques dans la modélisation dynamique des interactions génotype x environnement x conduite de culture pour une production intégrée du tournesol », associant l'INRA à Toulouse (UMR AGIR, UR BIA, équipe Tournesol du LIPM), l'ACTA et le CETIOM.

Références bibliographiques

- Aubertot J.N., Robin M.H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment. I. Conceptual bases. PLOS ONE 8(9):e73202. doi:10.1371/journal.pone.0073202.
- Bertrand F., Tourvieille D., 1987. Phomopsis du tournesol : tests de sélection. *Informations Techniques CETIOM* 98, 12-18.
- Bordat A., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Seassau C., Vincourt P., 2011. Phoma et dessèchement précoce du tournesol, Point Technique CETIOM, 86 p.
- Bordat A., Mestries E., Dechamp-Guillaume G., Bros V., Descorps C., Marchal L., Perez R., Vincourt P., 2012. Genetic variability and QTL for sunflower tolerance to premature ripening caused by *Phoma macdonaldii*. Proceedings of the 18th International Sunflower Conference, February 27 – March 1, Mar del Plata & Balcarce, Argentina, pp. 163-168.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisation and parameterization of the STICS crop model., 297 p.

Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I, Volay T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p.

Casadebaig P., Guillioni L., Lecoœur J., Christophe A., Champolivier L., Debaeke P., 2011. SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 163-178.

Chollet D., Estragnat A., Jouffret P., Lagarde F., Mestries E., Penaud A., Pinochet X., 2002. Les maladies du tournesol, Point Technique CETIOM, 72 p.

Debaeke P., Mestries E., Desanlis M., Seassau C., 2014. Effects of crop management on the incidence and severity of fungal diseases in sunflower. In: Arribas J.E. (ed), *Sunflowers: Growth and Development, Environmental Influences and Pests/Diseases*, Nova Science Pubs., New York, USA, pp. 201-226.

Desanlis M., 2013. *Analyse et modélisation des effets de la conduite de culture sur deux maladies cryptogamiques majeures du tournesol causées par *Phoma macdonaldii* et *Phomopsis helianthi**. Thèse INP Toulouse, France, 205 p.

<http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002382/01/Desanlis.pdf>

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* 49, 63-75.

DGAL/SDQPV, Terres Inovia, INRA, 2015. Note commune Mildiou du tournesol (*Plasmopara halstedii*), 2 p.

http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/Cultures/Tournesol/maladies/note_commune_mildiou_tournesol_2015.pdf

Gulya T., Rashid K.Y., Masirevic S.M., 1997. Sunflower diseases. In: Schneiter A.A. (Ed.), *Sunflower Technology and Production*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 263-379.

Jouffret P., Thibierge J., Labalette F., 2011. Atouts et besoins en innovations du tournesol pour une agriculture durable. *Innovations Agronomiques* 14, 1-17. <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2011/Volume-14-Juin-2011>

Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations Agronomiques* 14, 91-108. <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2011/Volume-14-Juin-2011>.

Mestries E., Lecomte V., Duroueix F., 2014. Le mildiou du tournesol : les clés pour mettre en place une lutte durable. Réunions Techniques Régionales CETIOM, Ondes (31) et Agen (47), 11-12 décembre 2014, 83-92.

Vear F., Muller M.H., 2011. Progrès variétal chez le tournesol : l'apport des ressources génétiques au sein du genre *Helianthus*. *Innovations Agronomiques* 14, 139-150.

<http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2011/Volume-14-Juin-2011>

Wagner D., 2013. Enquête sur les conduites du tournesol : synthèse nationale. Document interne CETIOM, 22 p.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)