Intégration des contraintes biotiques dans la modélisation dynamique des interactions génotype environnement conduite de culture pour une production intégrée du tournesol

Emmanuelle Mestries
Mail : e.mestries@terresinovia.fr

© Terres Inovia

Responsables des équipes impliquées

- Mestries Emmanuelle, Terres Inovia, Castanet-Tolosan
- Debaeke Philippe et Jean-Noël Aubertot, UMR1248 AGIR AGroécologie, Innovations, TeRritoires, équipe VASCO, Toulouse
- Vincourt Patrick, équipe Tournesol du LIPM, Toulouse
- Brun François, ACTA, RMT Modélisation, Toulouse
- Raynal Hélène, UR0875 MIAT Mathématiques et Informatique Appliquées, plateforme RECORD, Toulouse
- Experts : Moinard Jacques, DRAAF-SRAL Midi-Pyrénées ; Tourvieille Denis, INRA Clermont-Ferrand

Mots clefs

Complexe parasitaire, conduite culturale, couplage modèle de culture – modèle épidémiologique, outil pour l'évaluation de stratégies de production

Le tournesol est une culture présentant de nombreux atouts agronomiques, industriels et environnementaux. Dans le contexte Écophyto, son indice de fréquence de traitement faible lui ouvre 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 d'itinéraires techniques permettant de prendre en compte les interactions entre l'environnement (pression parasitaire locale, sol et climat), 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 sclerotiorium)*. 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 des outils d'aide à la construction de stratégies de production intégrée.

Contexte et objectifs :

Dans le contexte Écophyto, 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. Celle-ci passe par une réduction des pressions biotiques subies par la culture, en particulier celles liées au complexe parasitaire fongique qui touche la culture : mildiou, phomopsis, phoma et sclérotinia. Une meilleure connaissance du fonctionnement de la culture et des variétés de tournesol couplée à l'épidémiologie des maladies est nécessaire pour modéliser de manière intégrée les interactions variété x milieu (sol, climat, pression parasitaire locale) x conduite de culture et développer des outils d'aide à la construction de stratégies de protection et de production intégrées adaptées à chaque situation.

Méthodes

Une synthèse des connaissances

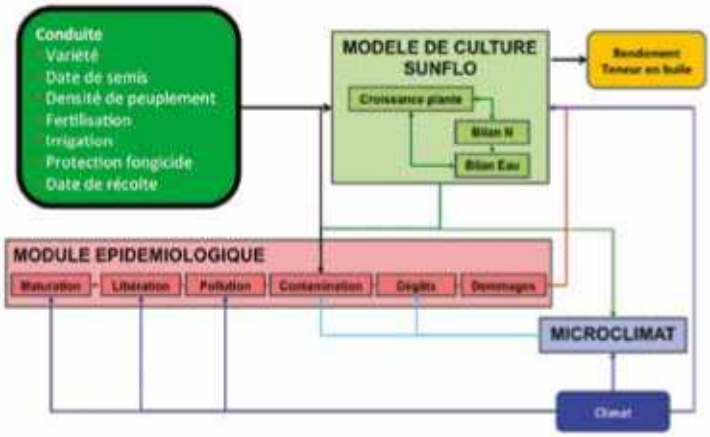
Une analyse de la littérature internationale a été ciblée sur les interactions agents pathogènes - conduite de culture - états de peuplement - environnement : connaissances épidémiologiques, fonctions de dommage, impacts des conduites culturales, identification des modèles spéci- ...

fiques existants et de leurs caractéristiques (données d'entrée, paramètres,...).
L'ensemble des données expérimentales utiles au projet disponibles auprès des partenaires a été rassemblé, à partir de bases de données existantes ou d'archives papier : données épidémiologiques, données expérimentales sur les effets des pratiques culturales sur les maladies (choix variétal, protection fongicide, fertilisation azotée, irrigation,...), données d'enquêtes sur les pratiques culturales et sur la pression « maladies » annuelle.

La mise en place d'expérimentations dédiées
Suite à l'analyse bibliographique et à l'exploitation des données disponibles, plusieurs manques de connaissances ont été identifiés et ont donné lieu à la conception et mise en place d'expérimentations en plein champ et en conditions contrôlées :
- étude du lien entre la conduite de culture et la mise en place et le développement des symptômes de phomopsis et phoma via le microclimat créé sous le couvert,
- évaluation de l'effet du stade phénologique de la plante sur la vitesse de propagation du phomopsis et quantification des dommages causés par le phomopsis sur les feuilles de tournesol,
- étude de conditions de réalisation des interactions entre phomopsis et phoma,
- acquisition de données épidémiologiques pour le phomopsis et le phoma,
- étude de la variabilité génétique du tournesol face au phoma et au dessèchement précoce.
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 très fin des symptômes : date d'apparition, site d'infection, vitesse de progression, identification des cas d'interaction phomopsis-phoma.

La construction du modèle SUNFLO_Maladies
Un modèle de simulation dynamique de la culture de tournesol (SUNFLO) a été développé dans l'UMR AGIR de Toulouse en collaboration avec l'UMR LEPSE de Montpellier et Terres Inovia. Cet outil construit à partir de travaux expérimentaux soutenus par PROMOSOL permet de simuler les performances (rendement, teneur en huile) et le comportement (eau consommée) des variétés de tournesol. Les principales contraintes abiotiques connues sur la culture sont prises en compte, telles que les besoins en azote et la disponibilité en eau. La conduite de culture est décrite par les principales interventions jouant sur le couvert (date et densité de semis, fertilisation azotée, irrigation). Ce modèle, appliqué à différents contextes (réseaux de parcelles d'agriculteurs, réseaux d'essais d'évaluation variétale), permet aujourd'hui de mieux qualifier le parcours des variétés soumises à différentes combinaisons milieu x conduite de culture, par l'identification des périodes de stress subies par la culture. En revanche, les stress biotiques induits par les maladies fongiques n'étaient pas pris en compte à ce stade malgré leur poids important dans les interactions génotype x environnement. L'objectif de ce projet est donc d'associer des modules « maladie » à ce modèle pour y intégrer les contraintes biotiques.

Le schéma conceptuel du modèle SUNFLO_Maladies a été construit d'après Aubertot et Debaeke (2006). Il 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 (endo- et allo-inoculum),
2) dispersion : prédiction de la date de libération des spores,
3) pollution et infection (symptômes/dégâts) : prédiction de l'incidence et de la sévérité de la maladie,
4) nuisibilité : prédiction de la perte de rendement et de teneur en huile en fonction de la sévérité des dégâts.
Ces modules seront couplés au modèle SUNFLO selon le schéma suivant, SUNFLO étant représenté en vert sur la figure ci-après :



Dans le temps du projet, cette démarche de modélisation dynamique a été mise en œuvre pour le phomopsis et le phoma.

Principaux résultats obtenus et applications envisageables, lien au plan Écophyto

Une meilleure connaissance de l'épidémiologie du phoma
L'épidémiologie du phoma a fait l'objet de nouvelles expérimentations visant à mieux comprendre les processus de maturation des pseudothèces de *Leptosphaeria lindquistii* et d'émission des ascospores. Les résultats confirment la capacité du champignon à émettre des spores contaminantes sur toute la durée du cycle du tournesol. Les premiers pseudothèces mûrs apparaissent dès février, bien avant le semis du tournesol, et leur proportion s'accroît jusqu'à la floraison du tournesol. Mi-mai, plus de 80% des pseudothèces 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 l'évaluation des variétés par exemple). 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 par le SRPV Midi-Pyrénées 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, mais le paramétrage serait à valider sur un jeu de données plus large, qui n'est pas disponible aujourd'hui. 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 60 000 pseudothèces en moyenne 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. Ces informations seront utiles à la modélisation du processus de maturation des pseudothèces et du processus d'émission des ascospores, permettant ainsi d'adapter le conseil de protection fongicide contre cette maladie.

Effets de la conduite de culture et du microclimat sur phomopsis et phoma

Les attaques de phoma sur tige apparaissent peu sensibles au microclimat, contrairement au phomopsis. Les contaminations naturelles suivent une progression acropète, du bas vers le haut de la tige. Une hypothèse explicative de ce phénomène est que le temps de latence serait différent selon la strate attaquée. Un modèle phénologique peut permettre de représenter cette progression dans le modèle SUNFLO_ Maladies. Le nombre de nœuds atteints varie selon la conduite de culture : plus la conduite est favorable, plus ce nombre est élevé. Le délai d'incubation dépend du stade phénologique de la plante : 360°C.jours en début de cycle, 180°C.jours en début floraison.

La vitesse de progression des symptômes dépend du statut azoté de la plante avant la phase de remplissage mais ne peut être modélisée, contrairement à celle du phomopsis.

Les attaques de phomopsis ont principalement lieu à la base de la plante (jusqu'à la 12e feuille), où le microclimat est le plus favorable tant que les tissus sont disponibles pour des contaminations. En conditions limitantes, le rôle du microclimat sur la dynamique des contaminations est particulièrement important ; en conditions climatiques non limitantes (pluies soutenues), le degré de fermeture du couvert joue sur la réussite des infections. Le nombre de feuilles infectées dépend avant tout de la sensibilité de la variété, de même que la vitesse de progression des nécroses. Le taux de passage de la nécrose de la feuille à la tige (symptôme nuisible) est lié à la longueur du pétiole, à la précocité de l'expression du symptôme sur feuille, à la vitesse de sénescence de la feuille et à la présence éventuelle d'une attaque de phoma sur tige (compétition). Alors que le microclimat est déterminant pour les attaques en pré-floraison, c'est l'importance de la surface verte réceptrice qui conditionne l'importance des attaques en post-floraison.

Interactions entre phomopsis et phoma

Ces interactions ont principalement été analysées sur les essais au champ. 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 pour empêcher le passage du phomopsis depuis la feuille sur la tige. Sur l'expérimentation au champ conduite en 2011, en conditions d'infection naturelle (phoma) ou semi-naturelle (phomopsis), ces interactions ont concerné 5% des sites d'infection observés. La synthèse des résultats a permis d'identifier les conditions favorables à l'expression de cette interaction et de proposer un schéma illustratif de l'impact de la conduite de culture (fertilisation azotée et densité de peuplement) sur l'interaction phoma-phomopsis.

Variabilité génétique pour la résistance au phoma collet et au dessèchement précoce, effet de la précocité variétale

De nombreux travaux antérieurs avaient déjà montré le caractère héritable et quantitatif de la résistance du tournesol face au phoma au stade "plantule". 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 du genre *Helianthus* pour la résistance au dessèchement précoce,
- le caractère polygénique et quantitatif de cette résistance et son indépendance par rapport à la précocité à floraison,
- un déterminisme génétique différent pour le dessèchement précoce et les attaques de phoma sur tige.

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

Un Point Technique dédié au phoma

Un ouvrage collectif dédié au phoma et au dessèchement précoce a été édité en 2011 dans la collection des Points Techniques du CETIOM. Il constitue une synthèse de l'ensemble des connaissances acquises sur le phoma et le dessèchement précoce du tournesol. Celles-ci s'organisent autour des trois « partenaires », la plante-hôte, l'agent pathogène et l'environnement dans lequel ils se trouvent, dont l'interaction conduit à une expression de la maladie plus ou moins importante. ■

Conclusions et perspectives

L'ensemble des connaissances acquises et des formalismes proposés ont permis d'initier la construction du modèle couplé SUNFLO_Maladies et son implémentation sur la plateforme de modélisation RECORD (https://www6.inra.fr/record). Ces résultats ont permis de mieux comprendre les processus épidémiologiques en jeu pour phomopsis et phoma, qui sont très particuliers au regard de l'ensemble des autres pathosystèmes. Les processus sous-jacents aux mécanismes de dommage ont également été explorés. Quatre usages peuvent être envisagés pour le modèle SUNFLO_Maladies : la compréhension des interactions variété – agents pathogènes – conduite de culture – environnement, un outil de raisonnement de la lutte fongicide, un outil de conception et d'évaluation d'itinéraires techniques de production intégrée et enfin un outil pour la conception d'idéotypes de tournesol adaptés. De plus, certaines avancées de ces travaux ont une portée générique, mobilisable pour d'autres pathosystèmes. Une approche complémentaire de modélisation (Injury Profile SiMulator ; Aubertot et Robin, 2013) de type qualitatif, permettant également de représenter les interactions au sein du complexe parasitaire, est en cours de développement pour le mildiou, le sclérotinia, le phomopsis et le phoma.

Références bibliographiques

> 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.

> 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.

> Desanlis M., Maury P., Aubertot J.N., Lagarrigue L., Debaeke P., 2012. Photosynthetic consequences of Phomopsis helianthi on two sunflower hybrids: analysis and modelling. Proc.18th Int. Sunflower Conf., ISA, Mar del Plata, Argentina, 396-401.

> Desanlis M., Mestries E., Lagarrigue L., Aubertot J.N., Debaeke P., 2012. Effects of sunflower canopy on Phomopsis helianthi epidemics. In: ECA, Plant and Canopy Architecture Impact on Disease Epidemiology and Pest Development, International Conference, Rennes, France, p. 24.

> 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.

> Seassau C., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Debaeke P., 2012. Low plant density can reduce premature ripening caused by Phoma macdonaldii. Europ. J. Agronomy 43: 185-193.