Rapport scientifique du projet SUNFLOWERPEST

Jean-Noel Aubertot, Amaia Costa, Marie-Anne Vedy Zecchini, Guillaume Robaldo, Emmanuelle Mestries, Pierre Casadebaig, Philippe Debaeke

▶ **To cite this version:**

Jean-Noel Aubertot, Amaia Costa, Marie-Anne Vedy Zecchini, Guillaume Robaldo, Emmanuelle Mestries, et al.. Rapport scientifique du projet SUNFLOWERPEST. [Rapport Technique] 2019. hal-02791087

HAL Id: hal-02791087
https://hal.inrae.fr/hal-02791087

Submitted on 5 Jun 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.

RAPPORT SCIENTIFIQUE DU PROJET SUNFLOWERPEST

Septembre 2019

Coordinateur

Jean-Noël AUBERTOT (DR INRA, UMR AGIR)

Contributeurs

Amaia Costa (stagiaire EI Purpan)

Marie-Anne Vedy-Zecchini (stagiaire M2 Université Paul Sabatier, puis doctorante SEVAB)

Guillaume Robaldo (CDD informaticien)

Emmanuelle Mestries (Ingénieur Terres Inovia)

Pierre Casadebaig (CR INRA)

Philippe Debaeke (DR INRA)

Partenaires

Membres de Promosol, notamment :

Muriel Archipiano (Soltis), membre du comité de pilotage du projet

Virginie Mirleau-Thebaud (Syngenta), membre du comité de pilotage du projet

Résumé

Le tournesol est soumis à un ensemble de pressions biotiques qui sont en partie responsables de la stagnation des rendements. Parmi ces bioagresseurs, le phomopsis (*Diaporthe helianthi*), le phoma (*Phoma macdonaldii*), le verticillium (*Verticillium dahliae*), le sclérotinia (*Sclerotinia Sclerotiorum*), et le mildiou (*Plasmopara halstedii*) apparaissent comme les maladies fongiques du tournesol les plus nuisibles au niveau national. La plante parasitaire *Orobanche cumana* entraine elle aussi des dommages importants sur le tournesol. Il est donc important de pouvoir hiérarchiser les dommages engendrés par ces bioagresseurs afin de concevoir des stratégies de gestion, notamment via l'amélioration variétale et le contrôle cultural. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de connaissances sur les mécanismes de dommage des bioagresseurs. Parmi les principaux mécanismes de dommage, on peut citer la réduction de la photosynthèse par une diminution de la surface photosynthétiquement active, la diversion d'assimilats, et la réduction de l'efficience de conversion par des effets systémiques sur le peuplement. L'objectif du projet SUNFLOWERPEST était de synthétiser les connaissances, les données, les éléments de modélisation disponibles dans un modèle de nuisibilité des principaux bioagresseurs du tournesol. Pour ce faire, on s'est appuyé sur une analyse bibliographique exhaustive, et la réalisation d'un inventaire détaillé des jeux de données disponibles chez les différents participants du projet. Au delà de la synthèse des connaissances que le projet a permis, le projet a autorisé le développement d'un modèle spécifique, appelé SUNFLOWERPEST mobilisant les connaissances disponibles. Ce modèle est d'ores et déjà disponible de manière gratuite, transparente, et accessible aux non spécialistes de l'informatique et de la modélisation via la plateforme en ligne xpest.inra.fr (développée dans le cadre du projet européen PURE ; http://www.pure-ipm.eu). Ce modèle permet une représentation simplifiée du fonctionnement écophysiologique d'un peuplement de tournesol, couplée à une série de mécanismes de dommage associée à un profil de dégât dynamique. SUNFLOWERPEST peut représenter les dommages engendrés par des bioagresseurs individuels, ou par un ensemble de bioagresseurs. L'analyse bibliographique et les jeux de données identifiés ont révélé de larges trous de connaissance. Néanmoins, l'exercice a pu être mené jusqu'au bout pour 3 de ces bioagresseurs (le phomopsis, le sclérotinia au collet et l'orobanche), avec des proposition de formalismes *ad hoc*, et une évaluation de la qualité d'ajustement des relations proposés.

Une expérimentation type a été proposée afin de mieux appréhender les mécanismes de dommage associés aux principaux bioagresseurs du tournesol. Une fois consolidé, le modèle SUNFLOWERPEST permettra d'analyser les effets de différents profils de dégâts (définis par l'interaction entre le système de culture et la situation de production) sur l'élaboration du rendement du tournesol dans une situation de production donnée. Couplé à un modèle simulant les effets des pratiques culturales, des conditions pédoclimatiques et du territoire sur les profils de dégâts (hors projet), ces sorties permettront à terme la conception de systèmes de culture limitant les pertes de récolte occasionnées par les bioagresseurs, ainsi que la définition d'idéotypes adaptés à certaines situations de production associées à des pressions biotiques données.

Mots-clés : tournesol, bioagresseurs, nuisibilité, modélisation, protection intégrée des cultures, protection agroécologique des cultures

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION....4
1.1 Le tournesol, une culture agroécologique....4
1.2 Panorama synoptique des bioagresseurs du tournesol....5
1.2.1 Le phomopsis du tournesol....5
1.2.2 Le phoma du tournesol....6
1.2.3 La verticilliose du tournesol....7
1.2.4 Le sclérotinia du tournesol....8
1.2.5 Le mildiou du tournesol....9
1.2.6 L'orobanche, parasite du tournesol....10
1.3 Méthodes de gestion des bioagresseurs du tournesol....12
1.4 Etat de l'art sur la modélisation de la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol....14
1.5 Rappel des objectifs du projet....15
2. MATERIELS ET METHODES....16
2.1 Recherche d'informations sur la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol....17
2.2 Proposition d'une fonction de nuisibilité pour chaque bioagresseur....19
2.3 Fonctionnement de la plateforme ModelBuilder....20
2.4 Ajustement des fonctions de dommage....22
3. RESULTATS....24
3.1 Identification de jeux de données....24
3.2 Détermination des fonctions de dommage....28
3.3 Implémentation des fonctions de dommage dans le modèle SUNFLOWERPEST....30
3.4 Ajustement des fonctions de dommage....31
3.5 Exemples d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST....32
4. DISCUSSION....36
4.1 Portée et limites du projet....36
4.2 Perspectives....37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES....41
ANNEXE 1. Description du modèle SUNFLOWERPEST telle que générée par la plateforme ModelBuilder 46
ANNEXE 2. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 1 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (cas avec un seul bioagresseur, l'orobanche)....48
ANNEXE 3. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 2 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (cas avec un seul bioagresseur, le phomopsis, mais avec plusieurs dynamiques de dégâts)....49
ANNEXE 4. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 3 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (deux bioagresseurs en interaction : le sclérotinia au collet et l'orobanche) ..50

1. INTRODUCTION

1.1 Le tournesol, une culture agroécologique

Le tournesol (*Helianthus annuus)* est connu pour être une culture simple, souple et adaptable à une large gamme de situations pédoclimatiques. Même si son potentiel est plus élevé en sols profonds, il s'adapte à tout type de sol grâce à sa rusticité. La culture présente tout d'abord l'avantage d'être peu exigeante en azote, le besoin en azote total étant généralement de 150 kg/ha. Le sol fournit 50% de l'azote nécessaire grâce à l'enracinement profond de la culture. Le système racinaire profond du tournesol permet également d'exploiter au maximum l'eau et les nutriments dans les couches profondes du sol ; le besoin hydrique sur l'ensemble de son cycle est de 420 mm (pluies + réserve en eau du sol ; TERRES INOVIA, 2017a). En France environ 95% des surfaces en tournesol ne sont pas irriguées (DEBAEKE et al*,* 2017). La sobriété du tournesol vis-à-vis de l'azote assure un bilan énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (GES) satisfaisant comparés aux céréales ou au colza (DEBAEKE et al*,* 2017). Grâce à la génétique et au fait d'avoir un cycle court, le recours aux produits phytosanitaires est faible. L'indicateur de fréquence de traitement (IFT) moyen est de 2,4 (avec traitement de semences – 1,9 hors traitement de semences) dont 1,4 point lié aux herbicides (AGRESTE, 2016). Le tournesol est la seconde culture oléagineuse la plus présente en agriculture biologique après le soja, elle représente 18 000 ha en France, les rendements du tournesol en agriculture biologique atteignent 90% des rendements en conventionnel (DEBAEKE et al*,* 2017).

L'agroécologie est basée sur plusieurs principes écologiques, notamment sur la diversification de la biodiversité planifiée dans le but d'augmenter l'efficience de l'utilisation des ressources et d'augmenter la résilience aux aléas climatiques ou biotiques. L'intégration du tournesol dans les systèmes de culture a de nombreux intérêts pour l'agroécologie. Culture d'été à faible IFT, elle fait baisser l'IFT global de systèmes basés sur des cultures d'hiver (par exemple blé, colza), ayant des IFT plus élevés. De plus, le tournesol contribue à réduire la pression des bioagresseurs pour les autres espèces du système de culture, notamment en rompant le cycle des maladies telluriques des céréales et en luttant contre certaines graminées. Lors des rotations, il laisse le sol dans un état favorable pour la culture suivante. Lorsque la culture suivante est une céréale telle que le blé, l'effet bénéfique d'un précédent tournesol se traduit par une hausse moyenne du rendement de 15% du blé, par rapport à un blé sur blé (JOUFFRET et al*,* 2011). En outre, le tournesol rend d'autres services écosystémiques : il est une source importante de pollen et de nectar en début d'été pour l'activité des pollinisateurs et plus particulièrement les abeilles.

Dans un contexte de changement climatique, où des sécheresses de plus en plus brutales et fréquentes sont prédites dans le sud de la France, le tournesol semble être une culture adaptable à de nombreuses situations. Malgré ces avantages, les surfaces emblavées en tournesol en France ont beaucoup baissé (passant de plus de 1 million d'hectares au début des années 1990 à environ 600 000 hectares ces dernières années). De plus, le rendement moyen national est en général compris entre 21 et 25 q/ha et stagne. Cette stagnation peut être due au changement climatique, aux pratiques culturales non optimales, mais aussi à la localisation de la production dans les sols à plus faible potentiel et les régions les plus sensibles aux aléas climatiques, ou au retour trop fréquent du tournesol dans la succession culturale favorisant le développement de bioagresseurs. Il est probable que plusieurs de ces causes concourent à la faible progression des rendements (SARRON et al*,* 2016).

1.2 Panorama synoptique des bioagresseurs du tournesol

Comme d'autres cultures, le tournesol est soumis à un cortège de bioagresseurs qui est en partie responsable de la stagnation des rendements. Chez le tournesol, la phase semis-levée est particulièrement impactée par les ravageurs tels que les limaces, les pucerons ou encore les oiseaux. Certaines adventices entravent également le bon développement du tournesol, c'est le cas de l'ambroisie ou de l'*Orobanche cumana*. Enfin le tournesol est attaqué par un nombre élevé de maladies cryptogamiques, parmi lesquelles le phoma (*Phoma macdonaldii*), le mildiou (*Plasmopara halstedii*), le phomopsis (*Diaporthe helianthi*), le verticillium (*Verticillium dahliae*) et le sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) qui sont les maladies majeures du tournesol. Ces maladies ont le risque moyen de pertes de rendement le plus élevé au plan national (VINCOURT et al*,* 2011).

1.2.1 Le phomopsis du tournesol

L'agent pathogène du phomopsis fait partie des ascomycètes. Il présente deux phases : anamorphe (reproduction asexuée) et téléomorphe (reproduction sexuée), nommées respectivement *Phomopsis helianthi* et *Diaporthe helianthi.*

Le champignon se conserve sous forme de mycélium et de périthèces (fructifications sexuées) sur les débris de tiges qui restent sur le sol pendant l'hiver. Les périthèces formés par ce mycélium apparaissent en fin d'hiver ou au printemps. Leur durée de vie est de cinq ans. Au cours du printemps, ils produisent des ascospores qui seront à l'origine de contaminations sur les feuilles. Il existe deux types de dissémination des ascospores. Tout d'abord, il existe une dissémination active : les ascospores sont libérées à chaque forte augmentation de la teneur en eau des tissus des débris de tige. Elles sont expulsées à une très faible distance et entrainées jusqu'aux feuilles par la pluie et le vent. La dissémination peut aussi être passive : dans ce cas, entre deux phases, humide et sèche, les périthèces exsudent leurs ascospores dans une gelée jaune-orangée. Les gouttes de pluie viennent alors dissoudre cette gelée projetant ainsi les ascospores sur les feuilles. Les ascospores vont germer et pénétrer la feuille grâce à un filament germinatif. Une température moyenne et une humidité persistante sont propices à la contamination (DESANLIS et al*,* 2013).

Le champignon va alors se développer sur les feuilles jusqu'à atteindre la tige. Les premières taches sur tige développent rapidement des pycnides (fructifications asexuées). Ces dernières produisent deux types de spores, des conidies α et β. Elles ne semblent pas avoir d'influence sur le développement de la maladie ou de l'épidémie. Dans le capitule, les graines atteintes hébergent le champignon superficiellement sur les téguments des akènes et à l'intérieur des amandes. Cependant, il n'y a pas de transmission directe par les semences. L'amande contaminée n'exprime pas la maladie en se développant.

Le phomopsis infecte les feuilles du tournesol à partir du limbe et entraine des symptômes foliaires qui ne sont pas nuisibles pour le tournesol. Une fois le pétiole traversé, le champignon s'attaque à la tige. Les lésions sur tige se forment au bout de 25-30 jours après l'infection initiale (MASIREVIC et GULYA, 1992). Une tache brun-rouge apparait sur le point d'insertion du pétiole. La nécrose progresse de part et d'autre du pétiole, puis encercle la tige (Figure 1). Les conséquences des taches encerclantes sur tige sont les plus nuisibles pour le tournesol. Une fois la tige encerclée, la moelle est rétrécie, voire complétement détruite. La sève ne circule plus et on observe un échaudage du capitule. La tige est fragilisée et peut se casser facilement sous l'action de la pluie ou du vent. Une attaque précoce peut être foudroyante, elle conduit à un brunissement généralisé de la tige et à sa mort précoce (DESANLIS et al*,* 2013). Les pertes de rendement dues à cette maladie sont élevées : 10% de taches encerclantes du phomopsis suffisent à faire perdre 1 à 3 q/ha et 1 point d'huile (TERRES INOVIA, 2017b). En moyenne, à l'échelle nationale

les pertes observées vont de 5 à 8 q.ha^{-1}, mais peuvent parfois atteindre 15 q.ha^{-1}, avec une diminution du poids de 1000 graines.

Les symptômes sur le capitule restent les moins nuisibles pour le tournesol. Ils apparaissent tardivement et n'affectent pas le rendement.

Figure 1. Tache encerclante sur tige du tournesol due au phomopsis (source : TERRES INOVIA).

1.2.2 Le phoma du tournesol

Observé pour la première fois au début des années 1960 au Canada et en Argentine, ce champignon a été rapidement identifié. On connaitra d'abord sa forme asexuée *Phoma macdonaldii* Boerema, puis sa forme sexuée *Leptosphaeria lindquistii* Frezzi. Tout comme le phomopsis, la contamination du phoma est aérienne. Le phoma se conserve sur les débris végétaux contaminés et a un pouvoir contaminant de trois ans. La première année, on observe deux formes de fructifications présentes entre les mois de février et juillet : les périthèces et les pycnides. La deuxième année, les pycnides sont dominantes. Les périthèces contiennent des asques contenant huit ascospores. Leur capacité de dissémination par la pluie et le vent fait qu'elles sont responsables des contaminations primaires des tournesols des parcelles avoisinantes. Les pycniospores produites par les pycnides, elles, ne sont pas capables de contaminer au-delà de quelques mètres. En France, la production de pycnides pendant le cycle du tournesol n'a jamais été observée. Les épidémies de phoma apparaissent ainsi monocycliques, avec pour origine les ascospores issues des périthèces, de la même manière que pour le phomopsis (BORDAT et al*,* 2011).

Le phoma peut affecter tous les organes du tournesol : collet, feuilles, tige et capitule. Les attaques commencent en général au début de la floraison. Les plus fréquentes et les plus connues sont les attaques sur tige appelées « maladie des taches noires ». Elles se caractérisent par l'apparition d'une tache noire à l'insertion des pétioles. Les taches s'étendent et peuvent devenir coalescentes d'un étage foliaire à un autre. Elles peuvent provoquer un noircissement partiel ou total de la tige. Contrairement au phomopsis, les taches sont superficielles et n'affectent que l'épiderme et parfois en fin d'évolution, superficiellement le cortex (SEASSAU et al*,* 2010). Les attaques sur tige et sur feuilles sont les moins préjudiciables à la culture du tournesol, elles entraînent des pertes de rendement comprises entre 2 et 6 q/ha. En 1996, une nouvelle forme d'attaque de la maladie est apparue, elle donne lieu à des contaminations de bas de tiges. Au départ un manchon noir est observé au niveau du collet (Figure 2), s'ensuit un dessèchement précoce de la plante et la mort prématurée du système racinaire. Les racines secondaires

ont disparu et le pivot de couleur noirâtre est totalement desséché. Un complexe parasitaire est alors identifié à ce stade. Il semblerait que le phoma soit l'agent pathogène le plus fréquent, associé au macrophomina, et au verticillium comme champignons opportunistes. Les pertes de rendement peuvent alors atteindre 30, voire 50% (SEASSAU et al*,* 2010).

Figure 2. Attaque du phoma au niveau du collet du tournesol (source : TERRES INOVIA).

1.2.3 La verticilliose du tournesol

La verticilliose du tournesol causée par le champignon *Verticillium dahliae* Kleb, est connue pour être présente dans les cultures de tournesol du monde entier et plus particulièrement dans les zones tempérées*.* Cet agent pathogène appartient aux Deutéromycètes, champignons se multipliant de façon asexuée. Ce champignon tellurique ne se propage pas par contamination aérienne, son cycle se situe entre le sol et la plante. Les conditions favorables au développement du champignon sont un sol humide et des températures comprises entre 20 °C et 27 °C.

Le verticillium se conserve dans le sol sous forme de microsclérotes. Leur durée de vie est très longue ; elle peut atteindre 14 ans sans culture d'espèces sensibles. La viabilité des microsclérotes peut être réduite en cas d'inondations du sol pendant de fortes chaleurs. Ce champignon possède la capacité de produire des microsclérotes en très grandes quantités : un gramme de biomasse aérienne sèche peut contenir 100 000 microsclérotes. Or, un à deux microsclérotes suffisent pour engendrer des attaques (MESTRIES, 2013).

La contamination s'effectue grâce aux exsudats racinaires du tournesol qui stimulent la production de mycélium par les microsclérotes. Le mycélium va pénétrer la racine jusqu'aux vaisseaux du xylème où le champignon va fructifier en formant des conidies. Ces dernières véhiculées par la sève vont contaminer tous les étages foliaires. Lorsque les graines sont atteintes, le taux de transmission de la maladie par les semences reste très faible, 1% environ. L'infection induit la sénescence prématurée des feuilles de la plante jusqu'à la plante entière. C'est alors que se forment les microsclérotes.

Les symptômes de la verticilliose peuvent apparaitre à tous les stades de développement de la plante : de la plantule jusqu'au stade adulte. Leur apparition se manifeste deux à trois semaines après l'infection. Les symptômes foliaires apparaissent souvent lors de la floraison. Au départ, on observe de petites taches qui deviennent par la suite des taches chlorotiques nécrosées avec un halo jaune (Figure 3). La chlorose va se développer entre les nervures de la feuille. Les feuilles atteintes finissent par se dessécher totalement et cela évolue du bas vers le haut. Les symptômes foliaires sont nuisibles au tournesol

lorsque le flétrissement des feuilles est compris entre 85 et 100% des feuilles de la plante (MESTRIES, 2013).

Au niveau de la tige on peut observer une bande noire continue qui commence à la base de la tige et peut atteindre la totalité de la tige. La bande apparait souvent d'un seul côté de cette tige, mais ne l'entoure jamais entièrement. La coloration noire de la tige est due aux microsclérotes présents sous l'épiderme. La moelle n'est pas touchée et demeure blanche.

En France, la nuisibilité de la verticilliose sur le tournesol est évaluée à 2 q/ha et 0,3 point de teneur en huile par tranche de 10% de plantes très touchées par la maladie (MESTRIES, 2018a).

Figure 3. Symptomes de verticilliose sur feuilles de tournesol (source : TERRES INOVIA).

1.2.4 Le sclérotinia du tournesol

Le sclérotinia est causé par l'agent pathogène tellurique *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary. Ce champignon se conserve dans le sol sous forme de sclérotes libres dans le sol ou dans les débris de culture. Ces derniers vont germer selon deux modalités. D'une part, les exsudats racinaires des pieds de tournesol vont permettre aux sclérotes de germer sous forme de mycélium contaminant ainsi les racines et le collet. Le mycélium se développe en bas de la tige entrainant la mort de la plante.

D'autre part, lorsque les conditions climatiques sont favorables, les sclérotes vont germer, donnant des apothécies. Ces dernières sont recouvertes d'asques contenant huit ascospores. Elles sont éjectées à chaque augmentation brusque de l'humidité relative et sont capables de contaminer le bourgeon terminal, les feuilles et le capitule. Après contamination, le mycélium va coloniser les différents tissus développant une pourriture blanche. Au niveau de ces zones de pourriture, le mycélium du champignon va s'agglomérer en sclérotes qui rejoindront le sol pour passer l'hiver.

Le sclérotinia peut attaquer tous les organes de la plante : collet, bourgeon terminal, feuilles, puis tige et capitule. Cependant, les deux attaques les plus nuisibles sont celles du collet et celles du capitule. Lorsque le collet est touché, apparait une pourriture blanche et humide (Figure 4), c'est le mycélium qui se développe en bas de la tige. Ce dernier progresse vers le haut provoquant ainsi le flétrissement total et brutal de la plante.

Les pertes de rendement sont importantes et dépendent du taux et de la précocité de l'attaque.

Sur capitule, les contaminations ont lieu à la floraison. Elle sont favorisées par les périodes pluvieuses. La contamination s'effectue grâce aux ascospores transportées au niveau des fleurons du capitule. Le mycélium issu de la germination des spores provoque tout d'abord la pourriture du dos du capitule. Il traverse ensuite son épaisseur et est à l'origine de sclérotes qui entourent les graines de tournesol. Les sclérotes et les graines tombent au sol, laissant un faisceau de fibres ligneuses au bout de la tige (Figure 4). Les pertes sont importantes : elles dépendent du taux et de la précocité de l'attaque, elles peuvent atteindre jusqu'à 50% (TERRES INOVIA, 2017c).

Figure 4. Attaque de sclérotinia sur collets (à gauche) et sur capitules (à droite) (source : TERRES INOVIA).

1.2.5 Le mildiou du tournesol

Le mildiou du tournesol est causé par un oomycète, *Plasmopara halstedii*. Il est considéré comme une des maladies cryptogamiques principales du tournesol (GASCUEL et al*,* 2015). Son cycle se déroule en deux phases de contamination sur le tournesol : une phase tellurique et une phase aérienne. La contamination primaire se déroule au stade jeune. Cette phase souterraine a pour origine des oospores. Ces dernières, ayant une espérance de vie de 10 ans, germent lorsque la température et l'humidité leur sont favorables. Les oospores émettent des zoosporanges qui libèrent des zoospores. Ces spores ont la particularité d'être biflagellées et peuvent ainsi se déplacer dans l'eau du sol pour infecter les jeunes plantules. Après l'infection, le mycélium se développe et progresse de façon systémique dans toute la plante (TOURVIEILLE DE LABROUHE et al*,* 2000). La contamination secondaire est essentiellement aérienne et a lieu sur les plantes jeunes jusqu'au stade six feuilles. Elle est importante dans la dissémination de la maladie. Lorsque l'humidité et les températures sont élevées, les symptômes issus des contaminations primaires (feutrage blanc sous les feuilles) fructifient, développant des sporangiophores à travers les stomates. Ces derniers émettent des sporanges qui, transportés par le vent, libèrent des zoospores qui infectent les plantes avoisinantes. La colonisation des tissus du tournesol par le mycélium permet la formation, après reproduction sexuée, d'oospores dans ces tissus, qui retournent au sol après récolte (TOURVIEILLE DE LABROUHE et al*,* 2000).

Pour le mildiou, trois types de symptômes sont visibles : le nanisme des plantes, la chlorose des feuilles et le feutrage blanc à la face inférieure des feuilles. Le symptôme le

plus nuisible est le nanisme, dû au raccourcissement de l'ensemble des entre-nœuds (Figure 5). A la période de floraison, le pédoncule floral est peu développé et ne s'incline pas comme chez les plantes saines. Un fois les plantes atteintes par le mildiou arrivées à maturité, le plateau capitulaire est entièrement stérile ou porte quelques graines de petite taille (TOURVIEILLE DE LABROUHE et al, 2000).

Figure 5. Nanisme du tournesol dû au mildiou (source : TERRES INOVIA).

1.2.6 L'orobanche, parasite du tournesol

Originaire du bassin méditerranéen, *Orobanche cumana* est une plante parasite présente depuis plus de 50 ans dans le sud de l'Europe et dans les pays du pourtour méditerranéen. L'apparition significative de cette angiosperme sur le tournesol en France est récente, les premières observations datent de 2009 (JESTIN et MARTIN MONJARET, 2016). Présente dès le mois de juin jusqu'à la récolte, *Orobanche cumana* se développe selon deux phases (Figure 6) : la phase souterraine et la phase aérienne. Les graines présentent dans le sol vont germer, stimulées par les exsudats racinaires de l'hôte. Des suçoirs se forment et pénètrent dans les cellules racinaires de l'hôte. Après une phase souterraine, l'orobanche va émettre une hampe florale qui va fructifier (phase aérienne). Chaque hampe produit entre 100 000 et un million de graines. Ces graines de très petites taille (0,2 à 0,3 mm) sont disséminées par le vent, l'eau, les outils ou encore les animaux... Du fait de leur faible masse (masse moyenne de mille graines : 3,3 mg), les graines peuvent être disséminées sur de très longues distances. La viabilité des graines dans le sol est supérieure à 10 ans (KADRY et TEWFIC, 1956 ; PARKER et RICHES, 1993 ; cités par GIBOT-LECLERC, 2004).

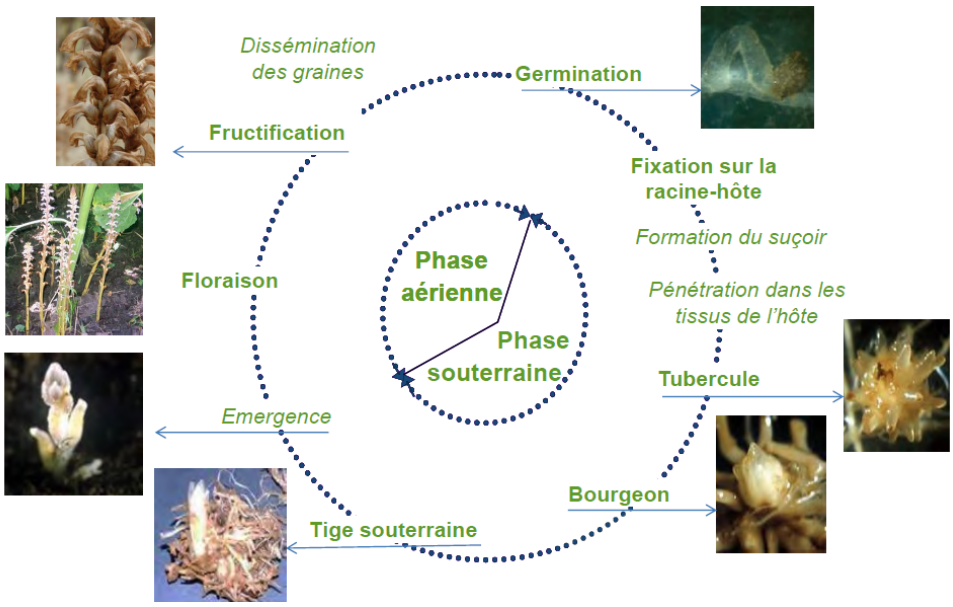


Figure 6. Cycle de développement de la plante parasite *Orobanche cumana* (source : TERRES INOVIA).

L'orobanche est une plante parasite stricte. Dépourvue de chlorophylle et de racine, elle se fixe aux racines du tournesol et développe des suçoirs qui lui permettent de s'alimenter en eau, en nutriments et en sels minéraux au détriment de son hôte. Présente dans tous les types de sols, *Orobanche cumana* est spécifique du tournesol contrairement à l'orobanche rameuse du colza qui a une très large gamme d'hôtes. La tige (hampe) non ramifiée est blanchâtre et les fleurs blanches à violacées (Figure 7). Elle mesure entre 40 et 50 cm (TERRES INOVIA, 2017d). *Orobanche cumana* a une nuisibilité très élevée : elle occasionne des pertes de 1,5 q/ha par hampe d'orobanche par pied de tournesol (JESTIN et MARTIN MONJARET, 2016). La perte est d'autant plus forte que l'attaque est précoce ou que le stress hydrique est important (GIBOT-LECLERC, 2004).

Figure 7. *Orobanche cumana* sur tournesol (source : TERRES INOVIA).

1.3 Méthodes de gestion des bioagresseurs du tournesol

La protection intégrée des cultures est un cadre conceptuel permettant d'atteindre les objectifs du plan Ecophyto II. Formalisée pour la première fois il y a une soixantaine d'années (STERN et al, 1959), la protection intégrée des cultures permet de réduire l'utilisation des pesticides afin de minimiser l'impact environnemental et le coût de la lutte tout en maximisant les résultats économiques de l'agriculteur. Le premier levier à activer est le contrôle génétique, autrement dit l'utilisation de résistances variétales. Comme le montre le Tableau 1, le contrôle génétique est efficace pour les cinq maladies fongiques détaillées précédemment et plus particulièrement pour le mildiou, la verticilliose et le phomopsis.

Le second levier à activer est l'adaptation des pratiques culturales. Pour les maladies fongiques d'origine aérienne telles que le phoma et le phomopsis, la première des précautions est de réduire la production d'inoculum primaire. Le broyage et l'enfouissement des tiges de la culture précédente privent le champignon de la lumière nécessaire à la production des ascospores. L'itinéraire technique de la culture du tournesol a également un effet sur le développement des maladies. Pour le phomopsis, une densité de peuplement et une fertilisation azotée élevées, ainsi que l'absence de stress hydrique génèrent généralement des états de couverts favorables aux contaminations. On observe une valeur d'Indice Foliaire élevée, une diminution du mouvement de l'air et une augmentation de l'humidité relative dans la canopée favorisant l'infection par le champignon (DEBAEKE et MOINARD, 2010). Une trop grande précocité des semis est aussi à éviter, le risque d'attaque et la sévérité sont moindres lorsque le semis est tardif (DEBAEKE et al*,* 2003).

Concernant les maladies d'origine tellurique, l'adaptation des pratiques culturales est différente. L'adaptation de la succession des cultures (diminution de la fréquence de retour du tournesol) est efficace comme méthode prophylactique. Cependant une fois la maladie installée dans une parcelle, l'adaptation de la succession des cultures n'est plus efficace du fait de la longue durée de survie des champignons telluriques (sclérotes de sclérotinia, microsclérotes de verticillium, oospores de mildiou). Concernant le mildiou, le semis dans un sol bien ressuyé permet d'éviter les contaminations primaires, les spores du mildiou requérant la présence d'eau libre pour atteindre les sites d'infection (TOURVIEILLE DE LABROUHE et al*,* 2000).

La lutte biologique n'est disponible que pour une seule maladie : le sclérotinia, grâce à l'utilisation d'un mycoparasite, *Coniothyrium minitans*, qui cause la destruction des hyphes et des sclérotes de *Sclerotinia sclerotiorum* (PENAUD et MICHI, 2009).

La biofumigation est une méthode physique de contrôle, explorée depuis peu pour la lutte contre le verticillium. Elle consiste à implanter un couvert riche en glucosinolates, généralement une crucifère. Lors de l'incorporation de ces dernières dans le sol, les glucosinolates se transforment en isothio- et thio-cyanates. Ces deux molécules volatiles et toxiques pénètrent dans le sol et tuent les microsclérotes (NEUBAUER et al*,* 2014).

Pour la protection intégrée du tournesol, le dernier levier à activer, et en dernier ressort uniquement, est la lutte fongicide. Elle n'est pas disponible pour toutes les maladies et compte peu de solutions. Concernant le phomopsis et le phoma, les traitements disponibles doivent être utilisés de manière préventive, et leur utilisation est raisonnée en priorité par rapport au risque phomopsis, maladie la plus nuisible. Le risque phomopsis est évalué dans les Bulletins de Santé du Végétal, en lien avec la résistance variétale et la situation de production. De plus, l'application d'une protection fongicide contre les attaques de phoma sur tige peut favoriser le passage du phomopsis de la feuille à la tige. Dans la pratique, moins de 20% des surfaces sont traitées contre le phomopsis, mais l'application apparaît peu raisonnée : des variétés à très bon comportement face à la maladie sont traitées, alors qu'elles ne devraient pas l'être (MESTRIES, 2018b). Concernant le mildiou, une seule molécule disponible est utilisée en traitement des semences. La part des semences de tournesol traitées en France s'élève à 85%

(MESTRIES, 2018b), alors que son efficacité face aux contaminations primaires est limitée par l'existence généralisée sur le territoire de souches de mildiou résistantes et par les risques de lessivage en cas de fortes pluies (TOURVIEILLE DE LABROUHE et al, 2000).

Tableau 1. Efficacité des méthodes de contrôle des principales maladies du tournesol (DEBAEKE et al, 2017).

+ : niveau d'efficacité de la méthode

- : pas de méthode disponible

	Mildiou Nanisme	**Verticillium** Flétrissement des feuilles	**Phoma** Dessèchement précoce	**Phomopsis** Tache sur tige	**Sclérotinia** Pourriture blanche
Contrôle génétique	+++	+++	+	+++	++
Contrôle chimique	++	-	++	+++	-
Contrôle physique	-	+	-	-	-
Contrôle biologique	-	-	-	-	+
Contrôle cultural	++	+	++	++	++

Concernant l'orobanche du tournesol, les travaux sur la résistance spécifique face à cette plante parasite ont permis la création de variétés à bon comportement. Cependant, cette résistance est contournée par le parasite. Afin que la résistance soit durable, les résistances quantitatives permettant de bloquer le parasite à différentes étapes de son cycle ont été cartographiées. Cette stratégie de couplage de résistances spécifiques et quantitatives permet de renforcer le caractère résistant et de limiter le risque de contournement (LE CRENN, 2016). Lorsqu'une parcelle est infestée, des mesures prophylactiques permettent de limiter la dissémination des graines. Plusieurs mesures sont envisageables : l'élimination des premiers pieds d'orobanche, la récolte des parcelles infectées en dernier, la désactivation du broyeur de la moissonneuse batteuse ou encore le nettoyage du matériel potentiellement infecté. Concernant la lutte agronomique, l'allongement des rotations permet la diminution du potentiel de multiplication (GRENZ, 2005). L'utilisation de variétés génétiquement résistantes à l'orobanche associée ou non à la lutte chimique est pour le moment la voie la plus efficace. La seule solution chimique autorisée en France et montrant une efficacité est l'utilisation de variétés tolérantes aux herbicides (variétés Clearfield) sur lesquelles un produit spécifique (Pulsar 40/Listego) est appliqué (JESTIN et MARTIN MONJARET, 2016). L'alternance des solutions est fortement conseillée afin de réduire le risque de contournement du levier variétal et/ou chimique.

La culture du tournesol, bien que sensible à un cortège de bioagresseurs, doit rester peu traitée car elle joue un rôle important dans le développement de systèmes de culture à bas niveaux d'intrants. Pour conserver ce rôle dans la diversification des systèmes de

culture, il est nécessaire de maîtriser le développement des bioagresseurs par une combinaison de méthodes de lutte culturale, physique, génétique, voire biologique. La modélisation apparaît comme une approche incontournable pour hiérarchiser la nuisibilité des différents bioagresseurs de la culture.

1.4 Etat de l'art sur la modélisation de la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol

Le modèle SUNFLO (CASADEBAIG et al, 2011) est un modèle dynamique construit sur la plateforme de modélisation et de simulation RECORD de l'INRA (https://www6.inra.fr/record). Il a été développé pour simuler l'élaboration du rendement et de la teneur en huile des variétés de tournesol en tenant compte du sol, du climat et de la conduite de culture. La prise en compte des interactions entre génotype, environnement et conduite permet d'améliorer l'évaluation variétale et le conseil face à la diversification croissante des systèmes de culture et des objectifs de production.

En 2016, une version du modèle SUNFLO intégrant deux maladies a été développé (phoma et phomopsis). Il est issu du couplage du modèle de fonctionnement de la culture SUNFLO avec deux modèles épidémiologiques simples. Il permet ainsi de prédire les dégâts (les symptômes) et les dommages (pertes de rendement et de qualité des graines) pour les deux maladies considérées, ainsi que les interactions entre agents pathogènes (un symptôme de phoma sur tige pouvant bloquer l'installation du phomopsis).

Le projet européen PURE (issu du groupe de recherche ENDURE, http://www.endure-network.eu), et l'association PROMOSOL ont permis de créer la plateforme informatique ModelBuilder (http://xpest.inra.fr) pour aider les praticiens (chercheurs et ingénieurs du développement) à développer des modèles de nuisibilité dans une situation de production donnée. La démarche de modélisation consiste à proposer une représentation générique et simplifiée du fonctionnement écophysiologique d'une culture, basée sur l'accumulation de biomasse au cours du temps et la répartition de celle-ci dans les différents organes de la plante (détaillée dans la partie « Matériel et méthodes »). Ce modèle de culture peut ensuite être couplé à une série de mécanismes de dommages associés à un profil de dégâts dynamique. Deux modèles ont déjà été développés sur le même principe : les modèles RICEPEST (WILLOCQUET et al, 2002) et WHEATPEST (WILLOCQUET et al, 2008). Ces modèles simulent la perte de rendement due aux bioagresseurs du riz et du blé (maladies, ravageurs, adventices) individuellement ou combinés, pour une situation de production donnée. Le modèle WHEATPEST comporte 13 bioagresseurs et le modèle RICEPEST compte 12 bioagresseurs.

En 2016, l'UMR AGIR a créé un modèle de culture du tournesol sur la plateforme ModelBuilder (VEDY-ZECCHINI, 2016). Ce modèle de culture se présente sous la forme de modèles atomiques (Figure 8) représentant l'environnement (Météo), le stade de développement de la culture (DVS), le taux d'accroissement de biomasse de la culture (RG), et les différents organes des plantes : racines, tige, feuilles, capitule et graines.

Pour développer ce modèle, l'ensemble des paramètres a été déterminé à l'aide d'une analyse bibliographique :

- le stade de développement en fonction du temps thermique (calculé à partir d'une température de base de 6°C) depuis l'émergence,
- l'efficience climatique (proportion du rayonnement global utile à la photosynthèse)
- le coefficient d'extinction (caractérisant l'atténuation du rayonnement traversant le couvert)
- l'efficience de conversion du rayonnement en matière organique (RUE ; *Radiation Use Efficiency*)
- la masse surfacique des feuilles (SLA ; *Specific Leaf Area*)

- les coefficients de répartition dynamiques du pool de biomasse créé de manière journalière vers les différents organes
- des coefficients dynamiques de sénescence décrivant la perte de surface photosynthétiquement active des feuilles.

On considère ici une culture homogène spatialement, où toutes les plantes sont au même stade de développement. Une fonction de sénescence fait diminuer la biomasse des feuilles entre la floraison et la maturité afin de simuler la sénescence de la culture. L'intérêt de ce modèle est de pouvoir simuler la biomasse dans les différents organes au cours du temps.

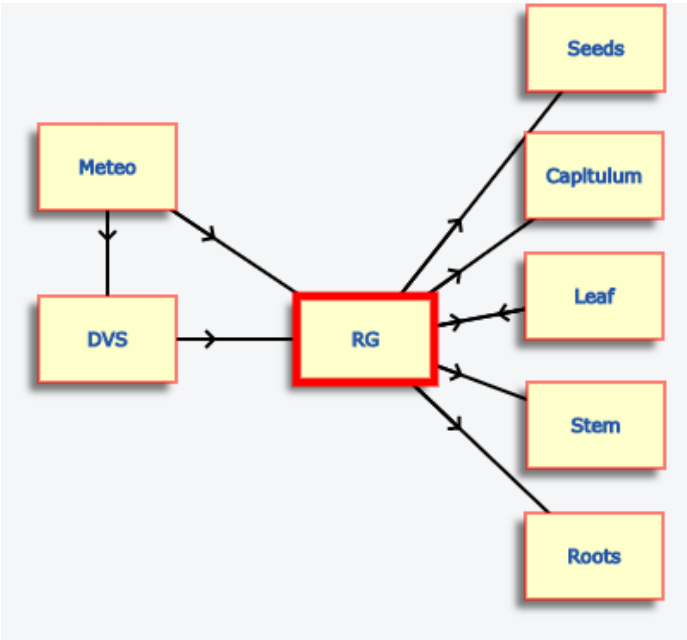


Figure 8. Modélisation du fonctionnement écophysiologique du tournesol sur la plateforme ModelBuilder en l'absence de stress biotique (VEDY-ZECCHINI, 2016).

1.5 Rappel des objectifs du projet

Le projet comportait un objectif principal : le développement d'un modèle de nuisibilité des principaux bioagresseurs du tournesol ; et deux objectifs secondaires : une première hiérarchisation des dommages causés par les principaux bioagresseurs du tournesol, et une proposition de protocoles expérimentaux pour combler les trous de connaissance identifiés.

2. MATERIELS ET METHODES

Le projet s'est articulé en deux étapes. Une analyse bibliographique associée à une recherche de jeux de données INRA et TERRES INOVIA a tout d'abord été conduite pour caractériser la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol (COSTA, 2018). Des fonctions de dommage ont ensuite été développées pour chaque bioagresseur (COSTA, 2018). La Figure 9 présente de manière synoptique la démarche de modélisation suivie.

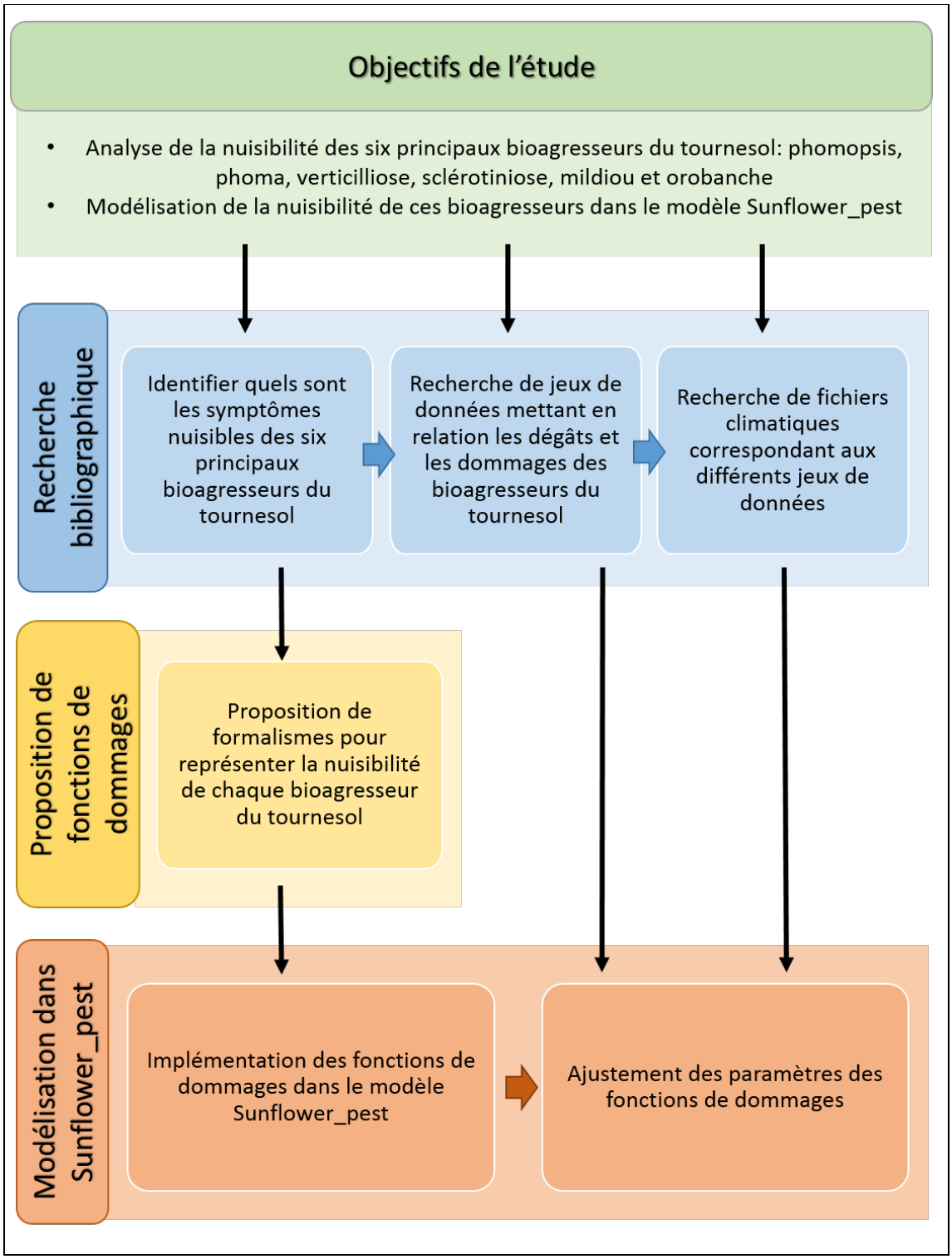


Figure 9. Représentation de la démarche méthodologique suivie pour le projet (COSTA, 2018 ?).

2.1 Recherche d'informations sur la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol

Une recherche bibliographique a tout d'abord été conduite pour chacun des six principaux bioagresseurs du tournesol : phomopsis, phoma, verticillium, sclérotinia, mildiou et orobanche. L'objectif était d'identifier quels étaient les symptômes nuisibles, des jeux de données *ad hoc*, et des modèles de nuisibilité le cas échéant.

Chaque bioagresseur peut provoquer des symptômes durant le développement du tournesol. Le premier objectif de la recherche conduite était d'identifier ceux qui sont réellement nuisibles, autrement dit, ceux qui ont un impact significatif sur le rendement de la culture du tournesol. Les sources d'informations utilisées pour déterminer quels sont les symptômes nuisibles peuvent être classées en deux catégories : les articles scientifiques et les documents techniques.

Les articles scientifiques ont été recherchés à l'aide des bases de données « Web of Science » et « Google scholar ». La recherche bibliographique a été conduite en utilisant les mots clés « Sunflower », « yield loss » et les différents noms des bioagresseurs.

En parallèle, un ensemble de documents techniques édités par Terres Inovia a été analysé. Ces documents spécialisés ont permis de compléter la description de l'épidémiologie de chaque bioagresseur, leur nuisibilité, ainsi que l'identification des organes affectés. Une fois ces références bibliographiques rassemblées, elles ont été synthétisées dans un tableau indiquant le bioagresseur, tous les symptômes induits et ceux qui se révèlent nuisibles (COSTA, 2018).

Une fois les symptômes nuisibles identifiés, il était nécessaire d'identifier des jeux de données expérimentaux permettant de mettre en relation les symptômes nuisibles et les dommages qu'ils entraînent. Compte tenu du dimensionnement du projet, aucune expérimentation n'était prévue dans le projet SUNFLOWERPEST. Il a donc fallu rechercher des jeux de données *ad hoc* dans la littérature française et internationale. Les sources de données peuvent également être classées en deux catégories : d'une part les jeux de données publiés dans des articles scientifiques, et d'autre part les jeux de données propres à l'INRA et à Terres Inovia. Pour la première catégorie, les bases de données bibliographiques « Web of Science » et « Google Scholar » ont été utilisées. Lorsque l'article ne présentait que partiellement le jeu de données, les auteurs de l'article ont été contactés pour obtenir le jeu de données complet. Pour la seconde catégorie, Emmanuelle Mestries, ingénieure Terres Inovia chargée d'étude en phytopathologie, a complété ces jeux de données en effectuant une recherche systématique dans la base de données expérimentale de Terres Inovia et en questionnant ses partenaires. Catherine Bonnet, ingénieure dans l'équipe VASCO de l'UMR AGIR, a également fourni un jeu de données pluri-annuelles issues d'observations sur un dispositif de longue durée de l'INRA (projet « MicMac Design »).

Plusieurs éléments sont indispensables pour pouvoir développer des fonctions de nuisibilité. Il faut tout d'abord disposer d'observations de dégâts (à différentes dates) et de mesures du rendement. Il est nécessaire également de disposer d'un témoin sans stress biotique évoluant dans les mêmes conditions que la culture attaquée afin de déterminer le rendement accessible dans une situation donnée. L'idéal est de disposer de jeux de données représentatifs d'une large gamme de situations. Il est souhaitable que les données portent sur le plus de variétés possible, présentant une large gamme de comportements face aux bioagresseurs d'intérêt avec le plus de variantes techniques possibles (irrigation, fertilisation par exemple) ; et ce, sur plusieurs années.

Au total, pour l'ensemble des bioagresseurs, quatorze de jeux de données seulement ont pu être identifiés. Les expérimentations retenues se sont déroulées entre 1978 et 2016. Toutes les expérimentations n'ont pas pu être exploitées (*cf.* partie résultats).

Une fois les jeux de données *ad hoc* identifiés, il a été nécessaire de rassembler les fichiers climatiques correspondants afin de pouvoir utiliser le modèle de culture Sunflower-pest. Les différents fichiers climatiques ont été trouvés, d'une part grâce à la base de données de Terres Inovia, et d'autre part grâce aux données en ligne de la NASA (https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov). Ce site permet d'avoir accès à un ensemble de fichiers climatiques dans le monde entier depuis 1983 jusqu'à aujourd'hui. Un ensemble de variables météorologiques, telles que le rayonnement solaire incident, les précipitations et les températures minimales, maximales et moyennes journalières sont disponibles. Il suffit de renseigner la longitude et la latitude de l'endroit souhaité, ainsi que l'année recherchée afin de télécharger le fichier correspondant.

Les données doivent ensuite être converties au format correspondant de la plateforme ModelBuilder. La Figure 10 est un exemple de fichier climatique pour le site d'Auzeville pour l'année 2016. La première colonne « MM » correspond au mois de l'année, la seconde « DD » au jour de l'année, la troisième colonne « Global radiation » au rayonnement global journalier (exprimé en $MJ.m^{-2}.j^{-1}$). Les deux dernières colonnes correspondent aux températures maximales et minimales journalières relevées (en °C).

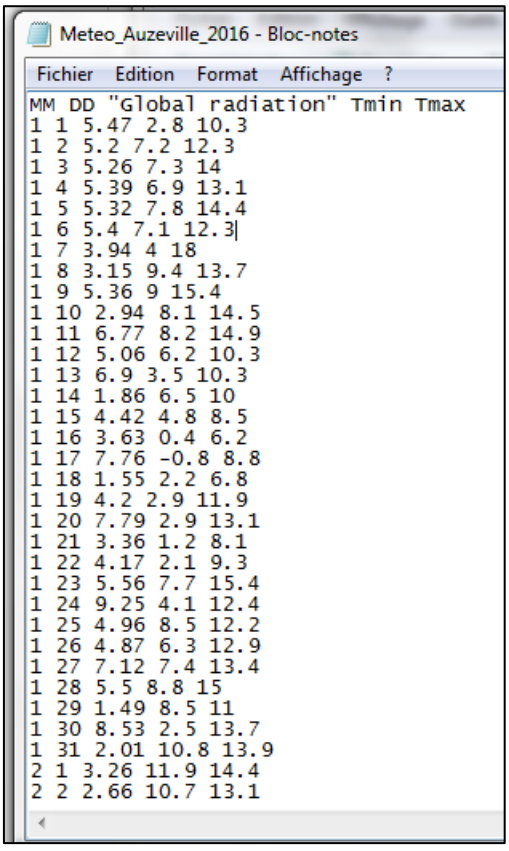


Figure 10. Extrait du fichier climatique d'Auzeville en 2016. MM : mois de l'année ; DD : jour de l'année ; Global radiation : rayonnement global journalier (en $MJ.m^{-2}.j^{-1}$) ; Tmin : température journalière minimale (en °C) ; Tmax : température journalière maximale (en °C).

2.2 Proposition d'une fonction de nuisibilité pour chaque bioagresseur

On cherche à proposer un formalisme permettant de représenter la nuisibilité de chacun des six principaux bioagresseurs du tournesol. Ce formalisme doit permettre de rendre compte des dommages engendrés par le bioagresseur en fonction de dégâts observés. Trois mécanismes génériques ont été proposés (WILLOCQUET et al, 2008). Lorsqu'un bioagresseur attaque une plante, il peut :

- diminuer l'indice foliaire, Leaf Area Index en anglais (LAI) ;

- diminuer l'efficacité de conversion du rayonnement, Radiation Use Efficiency en anglais (RUE) ;

- ou bien directement réduire la biomasse d'un organe.

Les fonctions de dommage que nous allons considérer seront donc des facteurs de réduction de l'efficacité de conversion du rayonnement (RUE), de l'indice foliaire (LAI) ou de la biomasse d'un organe. Lorsqu'il n'y a pas d'effet sur le fonctionnement de la culture, ces facteurs sont égaux à 1. Lorsque le stresse biotique est maximal, ces facteurs peuvent prendre une valeur nulle. Le facteur de réduction peut ne pas être proportionnel aux dégâts observés. Nous avons utilisé une fonction puissance à un seul paramètre, appelé « alpha » (l'exposant) afin de pouvoir rend compte de relations non linéaires.

Quand le paramètre alpha vaut 1, la relation est linéaire. Elle est convexe ou concave selon que alpha est strictement supérieur ou inférieur à 1, respectivement. Ce choix de formalisme permet une certaine plasticité de la fonction de nuisibilité de manière parcimonieuse. Dans la Figure 11, les pointillés illustrent cette plasticité. C'est ce paramètre « alpha » qui sera ajusté à l'aide des jeux de données afin représenter la nuisibilité des bioagresseurs.

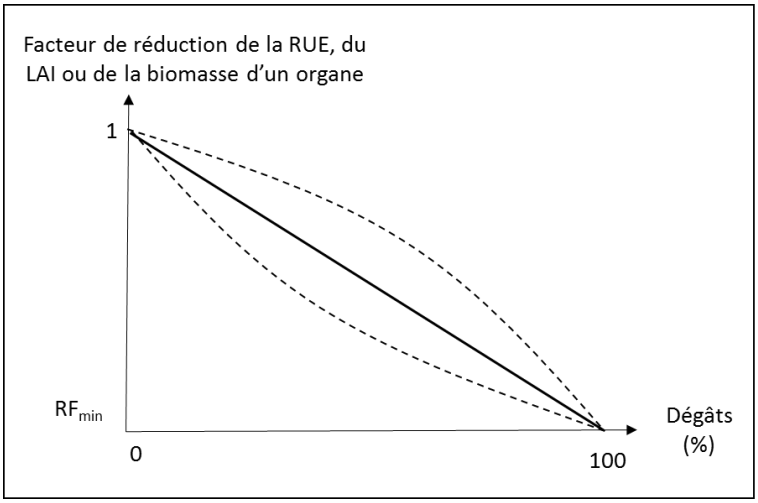


Figure 11. Evolution du facteur de réduction de la RUE, du LAI ou de la biomasse en fonction du niveau de dégâts en pourcentage. La ligne pleine représente une relation linéaire ($\alpha=1$), Les lignes en pointillés représentent des relations non linéaires ($\alpha>1$ dans la cas de la courbe convexe ; $\alpha<1$ dans la cas de la courbe concave).

2.3 Fonctionnement de la plateforme ModelBuilder

La plateforme de modélisation ModelBuilder est divisée en quatre sections : un court tutoriel, une section présentant l'ensemble des modèles disponibles pour un utilisateur enregistré sur la plateforme, une forge de modèles et le centre de simulations. Nous présenterons brièvement ces deux dernières sections. La forge de modèles de la plateforme ModelBuilder permet de modéliser n'importe quelle culture à l'aide de quatre modules en interaction (Figure 12). Le module « RG » représente le taux d'accroissement de la biomasse de la culture à chaque pas de temps (avec un pas de temps journalier). Cette croissance est rythmée par le module « DVS » qui permet de représenter le stade phénologique de la plante. Le stade est défini par un temps thermique, calculé à partir du module « Météo ».

Chaque module est caractérisé par une ou plusieurs variables, des paramètres constants ou dynamiques, et les liens qu'ils ont avec les autres modules. Les liens permettent de générer des flux de données quantitatives entre les modules à chaque pas de temps. Les flux entre modules peuvent se faire de manière simultanée (mode synchrone) ou se faire sur la valeur de variable au pas de temps précédent (mode asynchrone). Des modules représentant différents organes de la plante peuvent venir compléter le modèle (ex : tige, racines,…).

La simulation démarre au stade de l'émergence, avec une biomasse initiale des feuilles, racines et tige. La quantité de biomasse générale produite (RG) pendant un pas de temps suit l'équation de Monteith (MONTEITH et MOSS, 1977) :

$$RG = \left(ec * RAD * RUE * \left(1 - exp^{-k*LAI}\right)\right) \quad (1)$$

- *RG*, taux de croissance journalier de la culture au cours du temps (en $g.m^{-2}.j^{-1}$)
- *RAD*, radiation globale ($MJ.m^{-2}.j^{-1}$)
- *k*, coefficient d'extinction de la lumièredans le couvert (s.u.)
- ε_c * RAD, intensité du rayonnement utile à la photosynthèse (PAR)
- *LAI* (Leaf Area Index), ratio de la surface totale des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe (s.u.)
- *RUE* (Radiation Use Efficiency), efficience biologique représentant la biomasse créée par unité de radiation reçue ($g.MJ^{-1}$) par la plante.

La biomasse générale est distribuée, grâce à des coefficients de répartition dynamiques, dans les différents organes de la culture. Les variables de sortie de ce modèle de culture très simple est la biomasse de chaque compartiment, ce qui permet de disposer d'une représentation de l'évolution de la biomasse de chaque organe au cours d'une simulation, ainsi que du rendement obtenu.

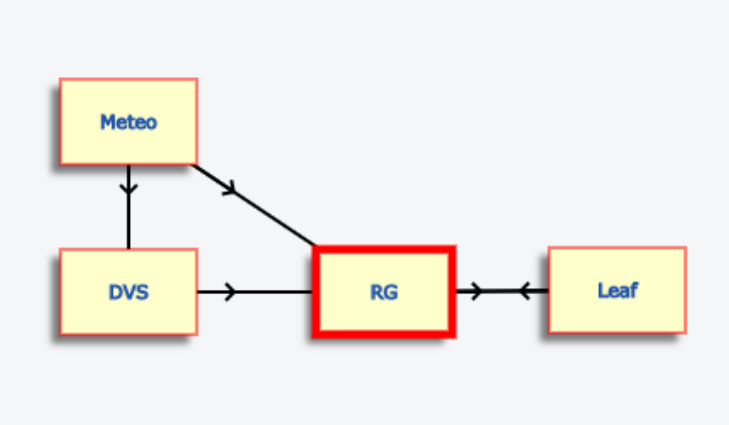


Figure 12. Copie d'écran de l'interface graphique de la forge de modèles de la plateforme xpest.inra.fr. Le modèle présenté est le modèle générique proposé par défaut. Il s'agit du modèle de culture le plus simple possible avec un seul organe représenté : les feuilles.

La seconde section importante de la plateforme ModelBuilder est le centre de simulation. Il permet de structurer facilement des plans de simulation (modification de paramètres et/ou des variables d'entrée) pour tout modèle développé sur la plateforme. Une fois les simulations réalisées, il est alors possible de procéder à une visualisation en ligne des résultats.

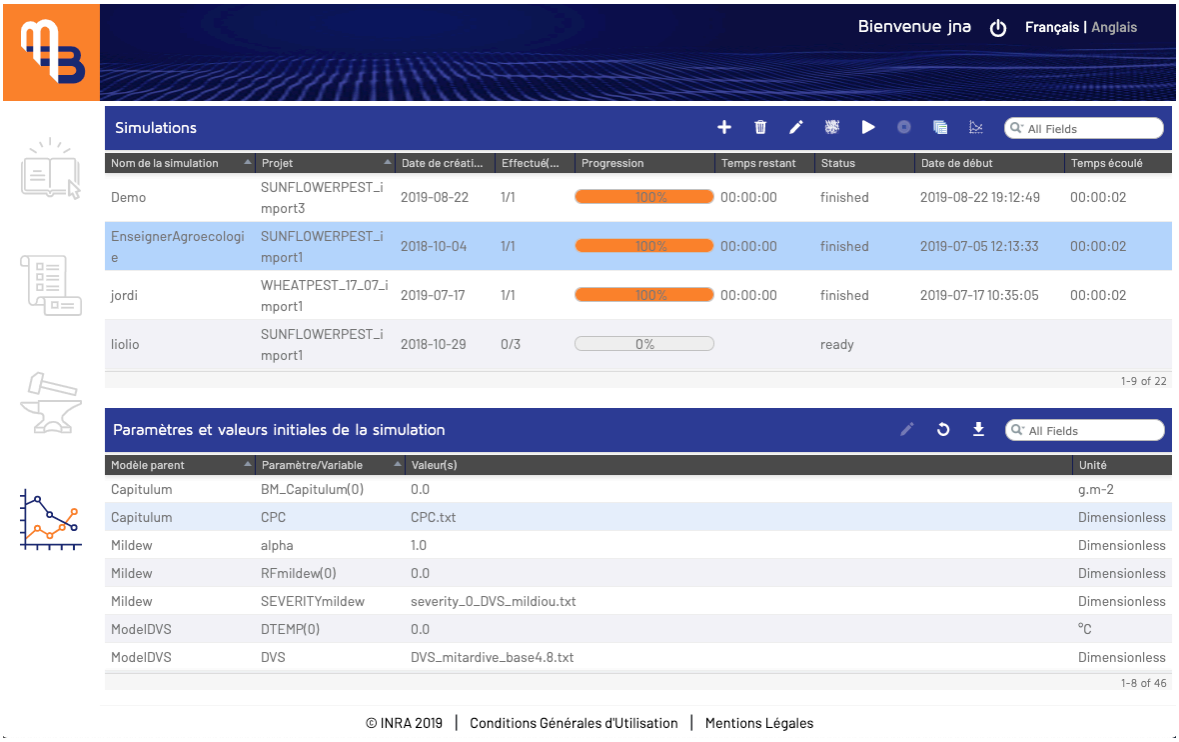


Figure 13. Copie d'écran du centre de simulation de la plateforme ModelBuilder, permettant de modifier facilement les valeurs des paramètres et des variables d'entrée pour réaliser un ensemble de simulations.

2.4 Ajustement des fonctions de dommage

Afin d'ajuster les fonctions de dommage, il faut d'abord ajuster la RUE en absence de maladie pour les différents jeux de données recueillis. L'ajustement de la RUE a été effectué pour chaque situation où l'on disposait d'une mesure de rendement accessible (*i.e.* sans stress biotique) en utilisant le fichier climatique correspondant.

Pour simplifier l'ajustement, nous avons fait l'hypothèse que la variable RUE était constante tout au long du cycle de la culture. Il ne s'agit pas d'une hypothèse très forte dans la mesure où les évolutions de RUE sont généralement faibles au cours du cycle de culture. L'ajustement de la variable RUE a été réalisé graphiquement grâce au centre de simulation de la plateforme.

L'ajustement des paramètres « alpha » des fonctions de dommage a été réalisé graphiquement. Pour l'équation de chaque bioagresseur, l'objectif était de trouver la valeur du paramètre « alpha » minimisant les erreurs du modèle. Le facteur de réduction des autres bioagresseurs a alors été fixé à 1 pour représenter le fait que la culture n'était attaquée que par un seul bioagresseur dans les expérimentations considérées.

Les variables d'entrée suivantes ont été utilisées avec le modèle Sunflower-pest :

- Le fichier climatique correspondant au jeu de données expérimental,
- La RUE ajustée en absence de maladie pour le bioagresseur et la situation concernée,
- la dynamique des dégâts.

Des multi-simulations ont été réalisées en faisant varier la valeur du paramètre alpha. Les rendements obtenus (en sortie du modèle) ont été comparés avec les rendements des jeux de données. Pour chaque fonction de dommage, la valeur du paramètre « alpha » minimisant l'erreur quadratique moyenne du modèle a été retenue. Le biais et l'efficience du modèle ont été calculés également. La manière de calculer ces critères et leurs significations sont présentés ci-dessous.

Afin de calculer le biais du modèle il faut d'abord comparer les rendements observés avec les rendements calculés par le modèle. L'écart entre une valeur simulée et la valeur observée correspondante est caractérisé par leur différence. Elle est notée :

$$D_i = Y_i - \hat{Y}i \quad (2)$$

Y_i est la valeur mesurée ou observée pour une situation i et $\hat{Y}_i$ est la valeur correspondante simulée par le modèle.

Une façon simple de résumer les valeurs de Di pour différentes situations est de calculer sa moyenne, autrement dit le biais du modèle.

$$Biais = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} D_i \quad (3)$$

Dans cette équation, N est le nombre total de situations. Le biais mesure la différence moyenne entre les valeurs calculées et mesurées. Si en moyenne, le modèle sous-estime la variable considérée, le biais est positif. Au contraire, si en moyenne le modèle surestime la variable considérée, le biais est négatif (WALLACH et al, 2006).

Le calcul du biais n'est pas suffisant pour résumer les erreurs d'un modèle. La valeur du biais proche de zéro peut être d'une part, la conséquence de très peu d'erreurs du

modèle dans toutes les situations ou sinon, d'erreurs importantes qui se compensent entre les sur- et les sous-estimations (WALLACH et al, 2006).

Il existe un indice de concordance qui permet d'éliminer le problème de compensation entre la sur- et sous-estimation, il s'agit de l'erreur quadratique moyenne ou mean squared error (MSE). C'est une mesure caractérisant la précision du biais. Pour chaque observation, la différence entre valeur calculée et valeur observée (l'erreur du modèle) mise au carré, permet, en faisant la moyenne des carrés sur toutes les observations, de calculer l''erreur quadratique moyenne. Elle s'écrit :

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(D_i)^2 \quad (4)$$

N est le nombre total de situations et *Di* est la différence entre les valeurs simulées par le modèle et les valeurs observées dans le jeu de données. L'objectif est d'avoir un biais et une MSE aussi faibles que possible.

L'efficience (EF) d'un modèle est également un critère couramment utilisé pour mesurer l'accord entre valeurs mesurées et valeurs simulées. Elle est définie par :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{y}\square)^2} \quad (5)$$

où Y_i est la valeur observée pour la situation i, $\hat{Y}_i$ est la valeur correspondante simulée par le modèle. $\bar{y}$ représente la moyenne des Y_i. Si le modèle est parfait, les valeurs simulées sont égales aux valeurs observées et EF=1. C'est la valeur maximale. Si les valeurs calculées sont égales à la moyenne des valeurs mesurées, le numérateur est égal au dénominateur et EF=0. Dans ce cas, un modèle n'explique pas plus la variabilité des mesures que la moyenne de ces mesures. Son efficience est alors nulle. L'efficience peut être négative.

3. RESULTATS

3.1 Identification de jeux de données

Afin d'identifier les jeux de données *ad hoc* pour modéliser la nuisibilité des principaux bioagresseurs du tournesol, il était nécessaire d'identifier les principaux symptômes responsables de perturbations de l'élaboration du rendement. Pour chacun des bioagresseurs, un seul symptôme nuisible a été identifié, hormis le sclérotinia pour lequel deux symptômes nuisibles différents ont été mis en évidence.

L'agent pathogène du phomopsis, *Diaporthe helianthi,* n'est nuisible que lorsqu'une tache encerclante apparait au niveau de la tige du tournesol. Les taches sur feuilles, les taches non encerclantes sur tige, ou les taches sur capitule n'affectent que très peu le rendement du tournesol.

Concernant le phoma, le symptôme le plus nuisible est le manchon noir au niveau du collet, qui entraine le dessèchement précoce de la plante.

Le verticillium, entraine le flétrissement progressif des feuilles du tournesol, il devient nuisible lorsque le flétrissement des feuilles est compris entre 85 et 100% de la plante entière.

Les deux symptômes du sclérotinia sont l'attaque sur collet qui provoque le dessèchement total de la plante et l'attaque sur le capitule qui entraine la chute des graines de la tête du tournesol.

Concernant le mildiou du tournesol, le symptôme le plus nuisible est le nanisme, car la plupart des plantes naines sont stériles et ne vont donc pas donner d'akènes.

Les principaux symptômes de l'ensemble des agents pathogènes considérés dans le projet sont résumés dans le Tableau 2 (COSTA, 2018).

L'*orobanche cumana* est une plante parasite se développant au détriment de son hôte, elle n'entraîne pas de symptôme visible sur la plante mais affaiblit considérablement le tournesol par une compétition pour l'eau, les nutriments et la lumière. On considère l'orobanche nuisible lorsqu'il y a présence d'hampes d'orobanche autour des pieds de tournesol (GRENZ et al, 2008 ; BAEYART, 2012 ; TERRES INOVIA, 2017d).

Tableau 2. Principaux symptômes, nuisibles ou non, pour cinq maladies du tournesol ainsi que les références bibliographiques associées.

Maladies	Symptômes	Symptômes nuisibles	Références bibliographiques
Phomopsis *Diaporthe helianthi*	Tache triangulaire sur feuille Tache encerclante sur tige Nécrose de forme arrondie sur capitule	Tache encerclante sur tige	ACIMOVIC, 1986 MASIREVIC et GULYA, 1992 PINOCHET et ESTRANAT, 1996 DIAZ FRANCO et ORTEGON MORALES, 1997 CHOLLET et al, 2002 DEBAEKE et ESTRAGNAT, 2009
Phoma *Phoma macdonaldii*	Tache noire sur tige Lésion sur feuille Manchon noir au niveau du collet entrainant le dessèchement précoce de la plante Tache noire arrondie sur capitule	Manchon noir au niveau du collet entrainant le dessèchement précoce de la plante	DONALD et al, 1987 CARSON, 1991 CHOLLET et al, 2002 SEASSAU et al, 2010 QUIROZ et al, 2014
Verticilliose *Verticillium dahliae*	Flétrissement progressif des feuilles de la plante	Flétrissement des feuilles compris entre 85 et 100% de la plante	BERTERO DE ROMANO et al, 1987 BERTERO DE ROMANO et al, 1994 CHOLLET et al, 2002 CREUS et al, 2007
Sclérotinia *Sclerotinia sclerotiorum*	Attaque sur collet Attaque sur capitule	Attaque sur collet Attaque sur capitule	DORRELL et Huang, 1978 GULYA et VICK, 1989 MASIREVIC et GULYA, 1992 CHOLLET et al, 2002
Mildiou *Plasmopara halstedii*	Décoloration des feuilles Feutrage blanc sur feuille Nanisme	Nanisme de la plante	TOURVIEILLE DE LABROUHE et al, 2000 CHOLLET et al, 2002 GASCUEL et al, 2015

Pour l'ensemble des bioagresseurs, quatorze jeux de données ont été identifiés (Tableau 3). Concernant le mildiou, un jeu de données mettant en relation le taux de nanisme et le rendement du tournesol a été identifié à l'INRA de Clermont-Ferrand, mais il n'a pas pu être mis en forme afin d'être exploité dans le temps imparti au projet. Par ailleurs, parmi les jeux de données identifiés, certains ne peuvent pas être exploités car ils ne disposent pas de témoin sans maladie, ce qui empêche le calcul de la perte de rendement relative. C'est le cas des jeux de données issus du projet Crucial (INRA) et de l'expérimentation « Tournesol » (Terres Inovia). Dans d'autres cas, le jeu de données comporte un témoin sans maladie, mais les rendements mesurés sans maladie sont plus faibles que les rendements avec maladie. Il n'était donc pas possible de calculer ici encore la perte de rendement relative. Les jeux de données concernés sont l'expérimentation « Phoma » (Terres Inovia) ; Verticiilum (Terres-Inovia) ; et du projet Sunrise (Syngenta). En outre, il faut signaler que certains jeux de données ne comportaient qu'une seule notation du symptôme. Ces données n'ont pu être exploitées car l'objectif du travail de modélisation était de rendre compte de processus dynamiques, notamment pour prendre en compte les interactions entre les mécanismes de dommage. Les jeux de données n'ayant pas pu être exploités car ils ne comportaient qu'une seule date d'observation des dégâts sont les suivants : expérimentations « phomopsis » (Terres Inovia) ; « Verticillium » (Terres Inovia) ; « Sclérotinia » (Terres Inovia). Enfin, le jeu de données du projet « Mic-Mac » (INRA) n'a pas été exploité pour une autre raison : pour chaque modalité, les dégâts de quatre maladies (phoma, phomopsis, verticillium et altenaria) ont été observées concomitamment. Il n'a donc pas été possible de déterminer quelle était la perte de rendement relative associée à chaque bioagresseur, considéré individuellement. Ce jeu de données pourra néanmoins servir à l'estimation de la qualité prédictive du modèle final.

Parmi les jeux de données recueillis, seuls trois ont pu être utilisés pour construire le modèle SUNFLOWERPEST : un pour le phomopsis, un pour le sclérotinia du collet, et un pour l'orobanche (Tableau 4). Les caractéristiques générales des jeux de données y sont énoncées.

Tableau 3. Ensemble des jeux de données identifiés pour six principaux bioagresseurs du tournesol afin de développer une fonction de nuisibilité *ad hoc*.

Bioagresseur	Expérimentation	Années	Exploitable
Phomopsis *Diaporthe helianthi*	« Phomopsis » (Terres Inovia)	1992-2008	non
	« Phomopsis » (Terres Inovia)	1994	oui
	« MicMac » (INRA)	2011-2016	non
	« Tournesol » (Terres Inovia)	1996-2010	non
Phoma *Phoma macdonaldii*	« Phoma» (Terres Inovia)	2003-2015	non
	« Tournesol » (Terres Inovia)	1996-2010	non
	« MicMac » (INRA)	2011-2016	non
Verticillium *Verticillium dahliae*	« Crucial» (INRA)	2016	non
	« Verticillum» (Terres Inovia)	2016	non
	« Sunrise » (Syngenta)	2014	non
Sclérotinia collet *Sclerotinia sclerotiorum*	DORELL et HUANG (Canada)	1978	oui
Sclérotinia capitule *Sclerotinia sclerotiorum*	« Sclérotinia » (Terres Inovia)	1993-1994	non
Mildiou *Plasmopara halstedii*	Aucun jeu de données exploitable	-	non
Orobanche *Orobanche cumana*	GRENZ et al (Roumanie)	2004	oui

Tableau 4. Ensemble des jeux de données utilisés pour construire des fonctions de dommage à intégrer dans le modèle Sunflower_pest, années concernées, description des caractéristiques de l'expérimentation

Bioagresseur	Jeu de données	Pays	Année	Caractéristiques
Phomopsis *Diaporthe helianthi*	« Phomopsis » (Terres Inovia)	France	1994	Essai irrigué 6 variétés 1 témoin traité 4 répétitions 4 notations de maladie
Sclérotinia (collet) *Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) de Bary*	DORELL et HUANG	Canada	1978	Essai non irrigué 1 variété 1 témoin traité 6 répétitions 8 notations de maladie
Orobanche *Orobanche cumana*	GRENZ et al	Roumanie	2004	1 variété 2 dates de semis 2 modalités d'irrigation 2 modalités de fertilisation 1 témoin traité 6 notations de maladie

Pour chacun des trois jeux de données présentés dans le Tableau 4, un fichier climatique a été récupéré. Il intègre la radiation solaire journalière, ainsi que les températures minimale et maximale journalières.

3.2 Détermination des fonctions de dommage

Suite à la recherche bibliographique, une fonction de dommage a été déterminée pour chacun des 6 principaux bioagresseurs du tournesol. L'objectif était d'obtenir un facteur de réduction (compris entre 0 et 1) de la RUE, du LAI, ou de la biomasse d'un organe, en fonction d'un niveau de dégâts (exprimé en pourcentage). Nous avons choisi le formalisme générique simple suivant :

$$RF_i = (1 - \frac{x_i}{100})^{\propto_i} \quad (6)$$

où *i* est un indice correspondant au bioagresseur considéré, x_i est le niveau de dégât observé (exprimé en pourcent), et $\propto_i$ est un paramètre de forme de la relation. Concernant le sclérotinia, deux fonctions de dommage ont été considérées car la recherche bibliographique a identifié deux dégâts nuisibles indépendants l'un de l'autre : d'une part, l'attaque du sclérotinia au niveau du collet, et d'autre part, l'attaque du sclérotinia au niveau du capitule.

Le verticillium a un symptôme nuisible uniquement foliaire ; le sclérotinia sur capitule, lui, ne va affecter que la biomasse du capitule alors les autres bioagresseurs affaiblissent

l'ensemble de la plante. De ce fait, la fonction de dommage du sclérotinia sur capitule va affecter la biomasse du capitule (BM_capitule). Concernant les autres, la fonction de dommage du verticillium va réduire la variable LAI tandis que les fonctions de dommage des autres maladies cryptogamiques vont affecter la variable RUE.

La fonction de dommage de l'orobanche a été déterminée par analogie à celle utilisée dans les modèles RICEPEST (WILLOCQUET et al, 2002) et WHEATPEST (Willocquet et al, 2008). Dans ces modèles, une fonction de dommage est associée aux différentes plantes adventices susceptibles d'attaquer la culture considérée. Tout comme l'orobanche, les autres adventices affectent le développement de la culture en entrant en compétition pour la lumière, les nutriments et l'eau. L'ensemble des effets des plantes adventices sur la physiologie du riz et du blé a été représenté par un facteur de réduction de la RUE (RF_{weed}), qui dépend de la biomasse des adventices par unité de surface de sol. Ce facteur de réduction s'écrit :

$$RF_{WD} = e^{-\alpha * WD} \quad (7)$$

où WD est la biomasse sèche de plantes adventices par m² de culture et α= 0,003 $m^2\ g^{-1}$ un paramètre (WILLOCQUET et al*,* 2008).

Nous avons donc proposé une fonction de dommage pour l'orobanche de la forme :

$$RF_{orobanche} = e^{-\alpha * BM_orobanche} \quad (8)$$

Où BM_orobanche est la biomasse de l'*orobanche cumana* et α un paramètre. Le paramètre α sera ajusté grâce aux jeux de données de l'*orobanche cumana*. La fonction de dommage de l'orobanche affectera la RUE.

Le Tableau 5 synthétise les différentes fonctions de dommage proposées pour chacun des 6 bioagresseurs considérés.

Tableau 5. Facteurs de réduction causés par les principaux bioagresseurs du tournesol affectant la variable RUE ou LAI ou la biomasse du capitule, en fonction d'un variable décrivant les dégâts associés

Facteur de réduction	Variable caractérisant les dégâts
$RF^{RUE}_{phomopsis} = (1 - \frac{x_{phomopsis}}{100})^{\alpha_{phomopsis}}$	% de plantes avec des taches encerclantes
$RF^{RUE}_{phoma} = (1 - \frac{x_{phoma}}{100})^{\alpha_{phoma}}$	% de plantes avec des taches au collet
$RF^{RUE}_{scléro_collet} = (1 - \frac{x_{scléro_collet}}{100})^{\alpha_{scléro_collet}}$	% plantes flétries à cause d'une attaque au collet
$RF^{BM_capitule}_{scléro_capitule} = (1 - \frac{x_{scléro_capitule}}{100})^{\alpha_{scléro_capitule}}$	% plantes avec le capitule attaqué
$RF^{RUE}_{mildiou} = (1 - \frac{x_{mildiou}}{100})^{\alpha_{mildiou}}$	% plantes naines
$RF^{LAI}_{verticillium} = (1 - \frac{x_{verticilium}}{100})^{\alpha_{verticilium}}$	% de plantes avec des feuilles flétries entre 85 et 100%
$RF^{RUE}_{orobanche} = exp^{(-\alpha_{orobanche} * BM_{orobanche})}$	BM_orobanche = biomasse d'orobanche par unité de surface de sol

3.3 Implémentation des fonctions de dommage dans le modèle SUNFLOWERPEST

La Figure 14 représente l'ensemble des interactions des six bioagresseurs du tournesol implémenté dans le modèle SUNFLOWERPEST (capture d'écran de la plateforme ModelBuilder). Chaque bioagresseur est représenté par un module de forme ovale, qui contient la description des fonctions de dommage présentées précédemment.

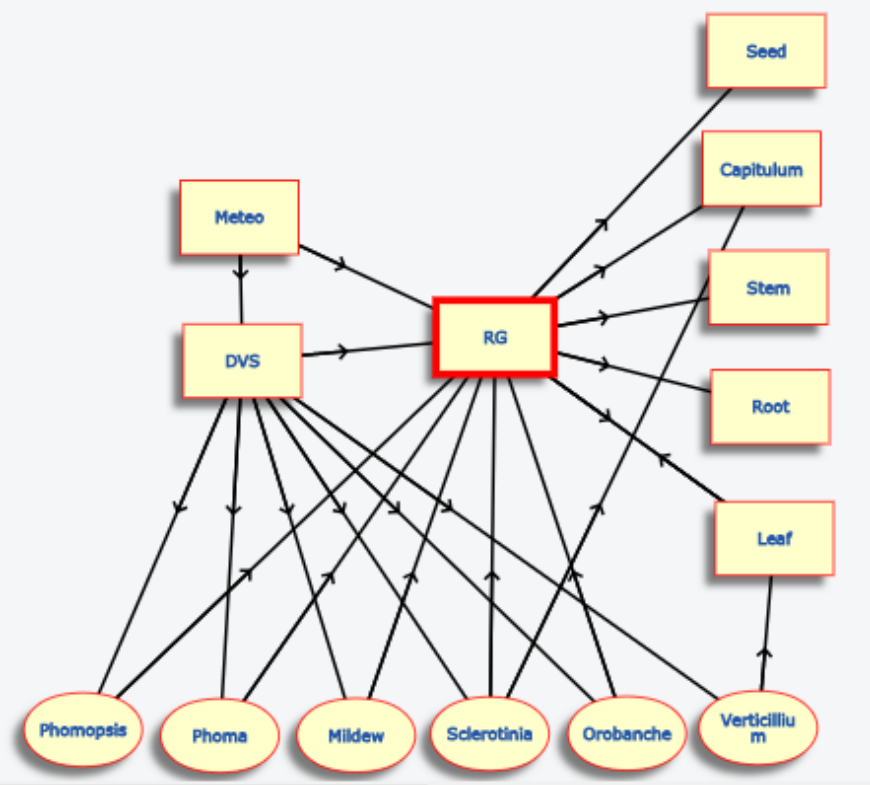


Figure 14. Représentation graphique de la structure de Sunflowerpest (capture d'écran de la forge de la plateforme ModelBuilder).

Le phomopsis, le phoma, le mildiou, le sclérotinia-collet et l'orobanche affectent la variable RUE. Nous avons donc introduit les facteurs de réduction en les multipliant dans l'équation de l'accroissement journalier de biomasse dans le module RG :

$$RG = \left(ec * RAD * RUE * RF_{phomopsis} * RF_{phoma} * RF_{scléro-collet} * RF_{mildiou} * RF_{orobanche} * \left(1 - exp^{-k*LAI}\right)\right) \quad (9)$$

Le verticillium réduit la surface foliaire du tournesol capable de photosynthétiser. Le facteur de réduction du verticillium ($RF_{verticillium}$) a donc été introduit dans le calcul de la variable LAI présente dans le module « Leaf » selon l'équation :

$$LAI = \left(BM_{Leaf} * SLA\right) * RF_{verticillium} \quad (10)$$

Le sclérotinia sur capitule va réduire la biomasse du capitule présent dans le compartiment « capitulum » selon l'équation :

$$BM_{organe} = \left(BM_{organe}(-1) + RG(-1) * CPorgane\right) * RF_{scléro-capitule} \quad (11)$$

3.4 Ajustement des fonctions de dommage

Une fois les formalismes de dommage implémentés dans le modèle SUNFLOWER, les paramètres « $alpha_i$ » intervenant dans le calcul des facteurs de réduction ont été déterminés par ajustement aux jeux de données. Seules trois (pour le phomopsis, le sclérotinia au collet et l'orobanche) des 7 fonctions de dommage ont pu être ajustées

faute de données disponibles. Tout d'abord, la RUE a été ajustée pour rendre compte du rendement mesuré sans stress biotique. Les dynamiques de dégâts issues des jeux de données, les RUE ajustées pour rendre compte du rendement hors stress biotique, ainsi que les fichiers climatiques ont ensuite utilisés comme variables d'entrées dans le centre de simulation de la plateforme ModelBuilder. Des multi-simulations ne faisant varier que le paramètre « alpha » des fonctions de dommage ont été effectuées afin d'estimer la valeur minimisant les erreurs de prédiction du modèle. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 6. Les trois fonctions ont des biais faibles, des erreurs quadratiques moyennes d'ajustement limitées, et d'excellentes efficiences pour le phomopsis et le sclérotinia au collet, et une efficience plus faible, mais satisfaisante pour l'orobanche.

Tableau 6. Fonctions de dommage optimisée à l'aide de jeux de données *ad hoc*, valeur du paramètre ajusté et qualité d'ajustement de ces fonctions (MSE : Mean Squared Error ; EF : Efficience).

Fonction de dommage	Valeur ajustée du paramètre	Qualité d'ajustement
$RF^{RUE}_{phomopsis} = (1 - \frac{x_{phomopsis}}{100})^{\alpha_{phomopsis}}$	$\alpha_{phomopsis}$ = 0,50	Biais = 0,31 % MSE = 6,86 % EF = 0,99
$RF^{RUE}_{scléro_collet} = (1 - \frac{x_{scléro_collet}}{100})^{\alpha_{scléro_collet}}$	$\alpha_{sclérotinia}$ = 40	Biais = -0,90 % MSE = 3,66 % EF = 0,91
$RF^{RUE}_{orobanche} = exp^{(-\alpha_{orobanche} * BM_{orobanche})}$	$\alpha_{orobanche}$ = 0,0043 $m^2.g^{-1}$	Biais = -0,12 % MSE = 3,53 % EF = 0,64

3.5 Exemples d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST

Le projet a permis de proposer 7 formalismes pour représenter la nuisibilité des 6 bioagresseurs considérés. Même si, faute de données, 4 d'entre eux ne peuvent être mobilisés pour réaliser des simulations aujourd'hui, tous les facteurs de réduction ont été implémentés dans le modèle SUNFLOWERPEST pour faciliter leur intégration quand de nouvelles connaissances seront disponibles.

Afin d'illustrer l'illustrer l'utilisation du modèle, nous avons réalisé 3 séries de simulations mettant en jeu les 3 bioagresseurs pour lesquels nous avons pu disposer de jeux de données *ad hoc* : le phomopsis, le sclérotinia au collet et l'orobanche (COSTA, 2018). Le premier exemple correspond à la simulation de la perte de rendement du tournesol causé par un bioagresseur unique (cas de l'orobanche). Le second illustre l'effet de différentes dynamiques de dégâts différentes sur la perte de rendement causée par un bioagresseur unique (cas du phomopsis). Enfin, le dernier exemple illustre l'utilisation du modèle pour simuler la perte de rendement causés par deux bioagresseurs en interaction (cas du sclérotinia et de l'orobanche).

Exemple 1 : cas de l'orobanche

Le centre de simulation du modèle SUNFLOWERPEST permet de visualiser directement les résultats en ligne. Dans l'exemple suivant, on a utilisé le fichier climatique d'Auzeville en 2016, ainsi qu'une dynamique de dégâts d'orobanche comme variables d'entrée dans le centre de simulation, ces dynamiques sont présentées en annexe (Annexe 2).

La Figure 15 représente l'élaboration du rendement au cours du temps pour une culture du tournesol implantée le 28 avril 2016 à Auzeville. La courbe bleue foncée représente l'évoluation de la biomasse des graines en absence de maladie. Le 6 septembre 2016, le rendement accessible pour cet environnement donné est de 41,7 q/ha. La courbe bleue claire représente l'élaboration du rendement du tournesol en présence d'*orobanche cumana.* Le 6 septembre, le rendement est de 21,8 q/ha. La perte de rendement due à *l'Orobanche cumana* est donc de 19,9 q/ha dans cette situation.

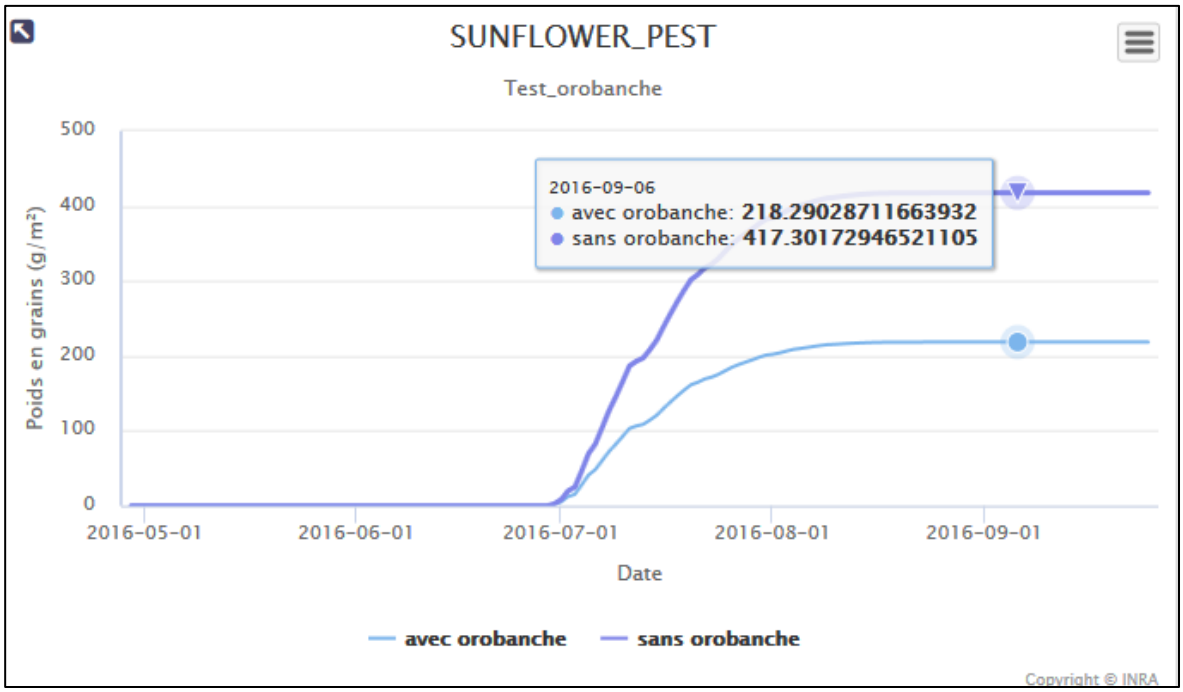


Figure 15. Simulation de l'élaboration du rendement (en g.m^{-2}) du tournesol en présence (courbe turquoise) et absence (courbe bleue foncée) d'orobanche à Auzeville en 2016 à l'aide du modèle SUNFLOWERPEST.

Exemple 2 : cas de différentes dynamiques de dégâts pour le phomopsis

Dans cet exemple, nous avons utilisé le fichier climatique d'Auzeville en 2016 (le tournesol est semé le 3 mai 2016), ainsi que trois dynamiques de dégâts différentes causées par le phomopsis : une première avec peu de plantes touchées par des taches encerclantes sur tige ; une deuxième avec un peu plus de taches encerclantes ; et enfin une dernière avec beaucoup de plantes portant des taches encerclantes. Ces dynamiques sont présentées en annexe (Annexe 3).

La Figure 16 représente des simulations d'élaboration du rendement du tournesol pour les scénarii différents. Les courbes représentent l'évolution du rendement (masse des graines) au cours du temps. La courbe turquoise représente l'élaboration du rendement du tournesol en absence de maladie. Dans cet environnement, le rendement potentiel maximum le 5 septembre est de 414,6 g.m^{-2} soit 41,5 quintaux par hectare. Les trois autres courbes représentent le rendement du tournesol pour différentes sévérités du phomopsis. Le scénario 3 (courbe bleue foncée) correspond au rendement ayant subi le plus de stress biotique, le 5 septembre 2016, son rendement est de 27,2 quintaux par hectare. Une perte de 14,3 quintaux par hectare est observée par rapport au rendement maximum. Les deux autres scénarii 1 et 2 correspondent au tournesol portant moins de taches encerclantes sur tige que le scénario 3, c'est pourquoi le rendement est plus élevé.

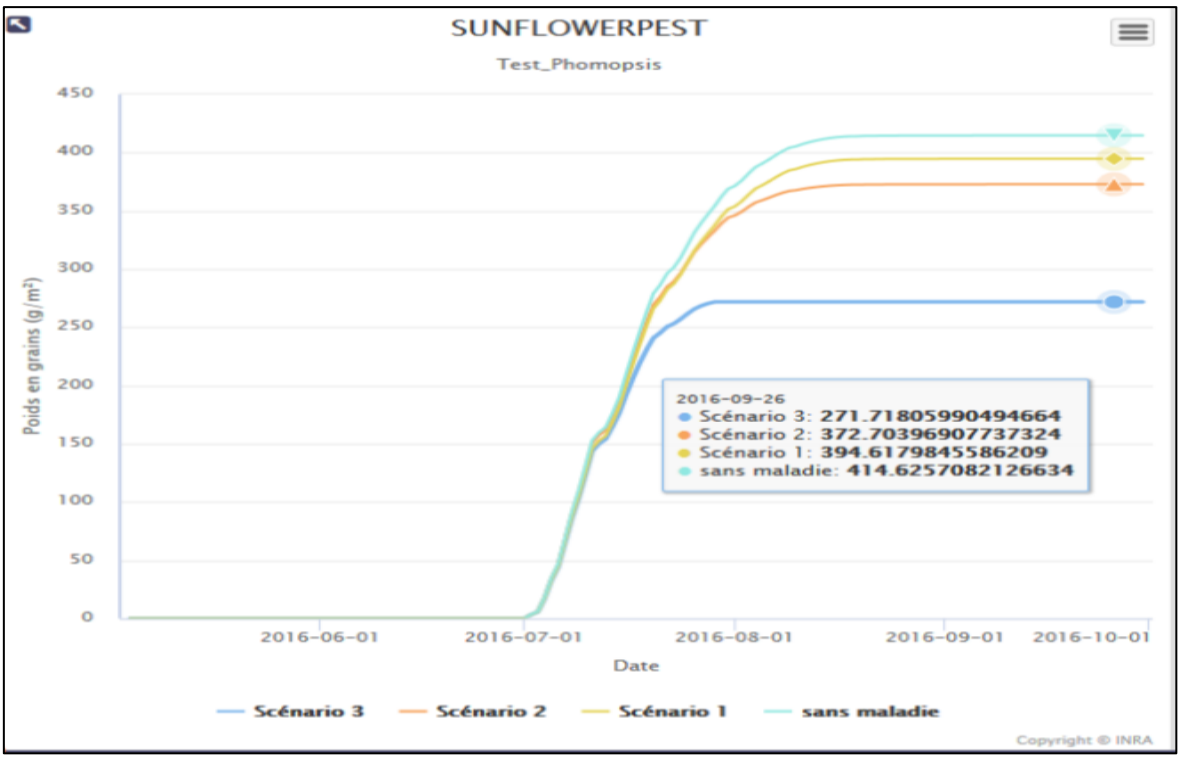


Figure 16. Multi-simulations de l'élaboration du rendement du tournesol à Auzeville en 2016, sans maladie et avec plusieurs dynamiques de dégâts dues au phomopsis dans SUNFLOWERPEST. La courbe turquoise « sans maladie » représente l'élaboration du rendement au cours du temps sans maladie. La courbe jaune « scénario 1 » simule l'élaboration du rendement au cours du temps avec une dynamique de dégâts due au phomopsis faible. La courbe orange « scénario 2 » simule l'élaboration du rendement au cours du temps avec une dynamique de dégâts intermédiaire. La courbe bleue foncée « scénario 3 » simule l'élaboration du rendement au cours du temps avec une dynamique de dégâts sévères.

Exemple 3 : cas de deux bioagresseurs en interaction (sclérotinia au collet et Orobanche cumana)

Dans cet exemple, on a utilisé le fichier climatique d'Auzeville en 2016 (la date de semis est le 28 avril 2016), une dynamique de dégâts due au sclérotinia au collet et une autre due à l'orobanche du tournesol (Annexe 4).

La Figure 17 représente l'élaboration du rendement pour quatre situations. La courbe bleue claire correspond au rendement potentiel sans bioagresseur, le 15 août elle est de 43,6 q/ha. La courbe jaune correspond au rendement du tournesol avec orobanche. La courbe orange simule le rendement du tournesol en présence de sclérotinia au collet. Enfin la courbe bleue foncée correspond au rendement du tournesol en présence des deux bioagresseurs précédents (avec les mêmes dynamiques de dégâts). Dans ce cas, le rendement le 15 août est de 19,5 q/ha.

Le modèle SUNFLOWERPEST est un modèle non-additif : la perte de rendement en cas d'expression des deux bioagresseurs n'est pas égale à la somme des pertes « individuelles » engendrées par chacun des deux bioagresseurs seuls. En effet la somme des pertes de rendement du sclérotinia et de l'orobanche séparément (courbe jaune + courbe orange) est égale à 24,7q/ha le 15 août. A cette même date, la perte de rendement du complexe sclérotinia et orobanche (courbe bleue foncée) est de 22,2 q/ha. On remarque ici que la structure du modèle conduit à une interaction entre mécanismes

de nuisibilité non linéaire et moins qu'additive (la somme des pertes de rendement causées par chaque bioagresseur considéré individuellement est inférieure à la perte calculée par le modèle prenant en compte les deux bioagresseurs simultanément).

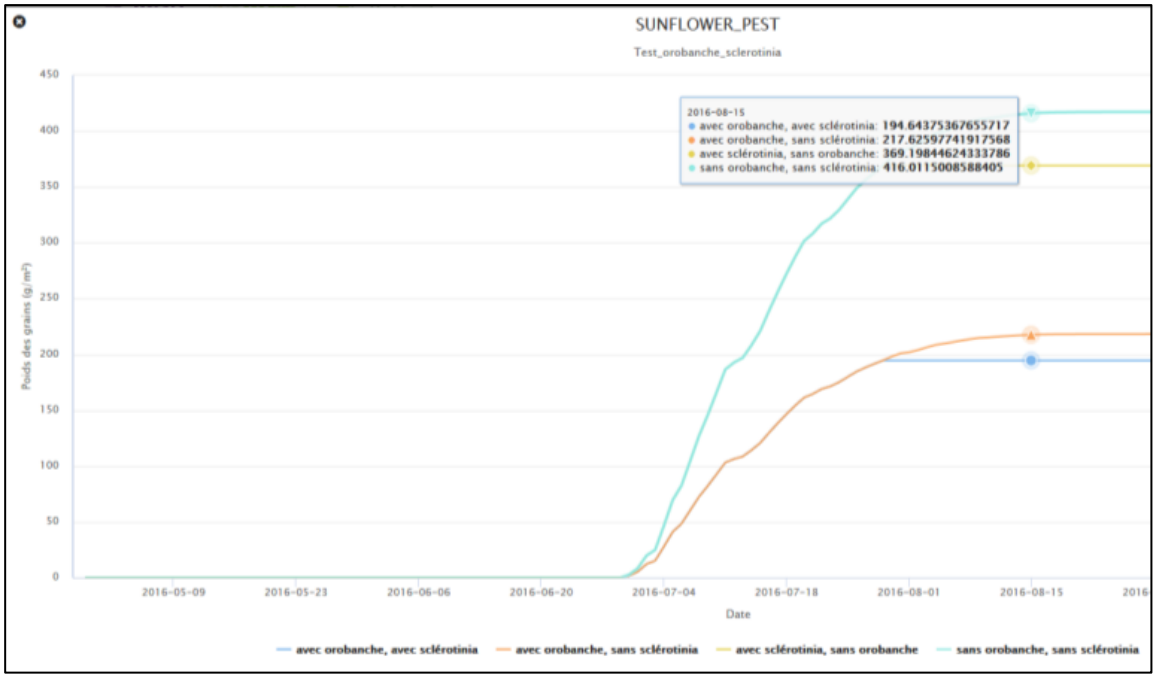


Figure 17. Simulation de l'élaboration du rendement (en g.m^{-2}) du tournesol à Auzeville en 2016, en présence et/ou absence du sclérotinia au collet et de l'orobanche à l'aide du modèle Sunflowerpest. La courbe turquoise représente l'élaboration du rendement au cours du temps en absence de maladie. La courbe jaune simule l'élaboration du rendement en présence de sclérotinia au collet. La courbe orange clair représente l'élaboration du rendement en présence d'orobanche. La courbe bleue foncée représente l'élaboration du rendement au cours du temps en présence d'orobanche et de sclérotinia au collet en interaction.

4. DISCUSSION

4.1 Portée et limites du projet

Le principal résultat du projet est la création et la mise à disposition des praticiens d'un modèle permettant de représenter les pertes de rendement engendrées par 3 bioagresseurs du tournesol : le phomopsis, le sclérotinia au collet et l'orobanche cumana. En outre, les quatre fonctions de dommage de trois autres bioagresseurs (phoma, mildiou, verticillium, sclérotinia du capitule) ont déjà été intégrées au modèle, mais il est nécessaire d'acquérir des données expérimentales et/ou d'estimer leur qualité de prédiction afin d'en estimer les paramètres. Le modèle proposé, SUNFLOWERPEST, est disponible gratuitement en ligne et est accessible aux non spécialistes de l'informatique et de la modélisation. Une interface graphique aussi intuitive que possible permet réaliser facilement des séries de simulation et de visualiser directement les résultats obtenus. Il permet d'ores et déjà de simuler le rendement accessible dans différentes situations, et d'analyser les pertes quantitatives de rendement pour 3 bioagresseurs du tournesol. La plateforme ModelBuilder, que le projet SUNFLOWERPEST a contribué à développer, permet de mettre à disposition des modèles de manière conviviale et transparente. Mais un de ses points forts est que maintenant, il est tout à fait possible de réaliser un transfert technologique pour toute équipe, en France, ou dans le monde, souhaitant poursuivre le travail. Il est non seulement possible d'utiliser le modèle depuis n'importe quel endroit dans le monde pourvu d'une connexion internet, pour réaliser des simulations, mais il est également possible de modifier très facilement les paramètres, les équations, ou la structure du modèle. La communauté travaillant sur le tournesol dispose désormais d'un outil susceptible de servir de support d'interactions entre agronomes, phytopathologistes, entomologistes, malherbologues et généticiens.

Le modèle SUNFLOWERPEST intègre les effets du génotype et la conduite de la culture sur l'élaboration du rendement au travers de la variable RUE. C'est une variable synthétisant les processus physiologiques de la plante conduisant à la production de biomasse par la photosynthèse. Elle varie avec le stade phénologique de la culture, le sol, le génotype, la conduite de culture (TRAPANI et al, 1992; LECOEUR et al, 2011 ; GAROFALO et RINALDI, 2015 ; MASSIGNAM et al, 2009). Les jeux de données utilisés pour développer les fonctions de nuisibilité ne comportaient pas de mesure de RUE. Il a donc été nécessaire de réaliser un ajustement pour estimer une dynamique de RUE pour chaque situation expérimentale à l'aide des rendements sans maladie mesurés dans les jeux de données. Pour ce faire, on a fait l'hypothèse que la variable RUE prenait une valeur constante tout au long du cycle du tournesol afin de faciliter les ajustements. Cette hypothèse est cohérente avec les modèles RICEPEST et WHEATPEST, pour lesquels la variable RUE ne prend que deux valeurs différentes et proches, en ne considérant deux périodes : avant et après floraison (WILLOCQUET et al*, 2002 ;* WILLOCQUET et al*,* 2008). Dans le modèle, la variable RUE est une variable d'entrée. Or, cette variable est difficile à estimer expérimentalement. Pour faciliter l'utilisation du modèle, trois dynamiques typiques de RUE ont été proposées : une faible, une intermédiaire et une élevée (VEDY-ZECCHINI, 2016).

Au delà du développement du modèle SUNFLOWERPEST, le projet a permis de rassembler les connaissances disponibles pour l'analyser la nuisibilité de six bioagresseurs du tournesol, que ce soit en termes de publications, ou de jeux de données. Pour les trois bioagresseurs pour lesquels des jeux de données ont pu être identifiés, la qualité d'ajustement des fonctions a été satisfaisante. Néanmoins, il conviendra d'estimer leur qualité de prédiction (*i.e*. de les tester sur des données n'ayant pas servi à estimer les valeurs de leurs paramètres). Le projet a également permis d'identifier les trous de connaissance. La principale difficulté rencontrée a été le manque de données disponibles.

En ce qui concerne le verticillium et le phoma, deux jeux de données n'ont pas pu être exploités car les témoins sans maladie n'étaient pas présents : projet Crucial (INRA) et expérimentation tournesol (Terres Inovia). Afin de palier à ce problème, le modèle SUNFLO (CASADEBAIG et al*,* 2011) pourrait être utilisé pour estimer le rendement accessible du tournesol en absence de maladie (en renseignant le génotype, la conduite de culture, le climat et le type de sol). Cette stratégie présenterait néanmoins l'inconvénient d'intégrer dans l'estimation des fonctions de dommage les erreurs de prédiction, inhérentes à tout modèle, du modèle SUNFLO.

Concernant le mildiou, un jeu de données mettant en relation nanisme et rendement du tournesol a été identifié à l'INRA de Clermont-Ferrand. Cependant, il n'a pas pu être mis en forme afin d'être exploité pendant la durée du projet. Il pourra être utilisé pour ajuster la fonction de dommage du mildiou.

Le sclérotinia du capitule est le seul cas pour lequel nous n'avons pu identifier de jeux de données exploitables. Un seul jeu de données a été identifié, mais les symptômes n'ont été observés qu'à une seule date, ce qui rend ne permet pas une approche dynamique de la modélisation du dommage. De ce fait, une expérimentation pour déterminer la nuisibilité du sclérotinia au capitule sera présentée dans la section 4.2.

Les jeux de données n'ayant pas pu être exploités du fait que le tournesol était attaqué par plusieurs bioagresseurs en même temps (impossibilité de déterminer la perte de rendement due à un seul bioagresseur) pourront servir à l'évaluation globale du modèle, une fois que l'ensemble des fonctions de dommages auront été développées.

4.2 Perspectives

Le projet a permis de réaliser un état des lieux aussi exhaustif que possible sur la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol. Certains jeux de données identifiés pourront être exploités pour évaluer la qualité de prédiction du modèle, une fois qu'un plus grand nombre de fonctions de dommages sera disponible.

Différents jeux de données issus d'entreprises semencières de tournesol et de Terres Inovia ont largement contribué au projet. Les agents de ces structures pourront en retour être formés à l'utilisation du modèle développé. Ainsi les sélectionneurs pourront-ils utiliser ce modèle pour aider à affiner leur stratégie d'amélioration des plantes, notamment pour prendre en compte l'effet d'un cortège de bioagresseurs. SUNFLOWERPEST pourra servir à identifier des idéotypes variétaux adaptés à un environnement et à des risques biotiques donnés (à la manière dont peut être utilisé le modèle SUNFLO ; DEBAEKE et al, 2011). Lors du comité de pilotage du stage d'Amaia Costa, les sélectionneurs présents ont montré un vif intérêt pour le modèle.

Enfin, le modèle SUNFLOWERPEST pourra contribuer à la mise au point de stratégies de protection agroécologique des cultures. Pour ce faire, on pourra le coupler au modèle IPSIM-Tournesol (HAMMOUD, 2014 ; ALLEGRE, 2015), en cours de développement (thèse de M.A. VEDY-ZECCHINI), et qui représentera les effets des pratiques agricoles (date et densité de semis, choix variétal, succession des cultures, travail du sol, fertilisation, …) ; du pédoclimat, et du paysage sur les stress biotiques du tournesol. Le couplage pourra être réalisé facilement en associant une dynamique type de dégâts à chaque prédiction qualitative du modèle IPSIM (AUBERTOT et ROBIN, 2013). L'utilisateur pourra ainsi générer un ensemble de stratégies de conduite dans une situation de production donnée qui conduiront, par simulation, à une estimation des dégâts finaux d'un ensemble de bioagresseurs. Ces résultats permettront de construire les fichiers d'entrée des modules bioagresseurs nécessaires pour réaliser les simulations à l'aide de SUNFLOWERPEST. Ainsi, le couplage des deux modèles permettra d'estimer l'impact de différentes conduites et stratégies de protection contre les bioagresseurs du tournesol sur le rendement final obtenu dans une situation de production donnée.

Dispositif expérimental

Compte tenu des trous de connaissance identifiés, une des conclusions du projet SUNFLOWERPEST est qu'il est important de mieux caractériser la nuisibilité des bioagresseurs du tournesol afin de hiérarchiser les risques, que ce soit pour l'aide à la sélection variétale, la conception de systèmes de culture, ou encore le pilotage de la recherche. Afin d'illustrer la démarche expérimentale à mettre en place, nous proposons de décrire un dispositif expérimental pour le cas où nous n'avons pas pu identifier de jeux de données *ad hoc* : celui du sclérotinia du capitule. L'objectif de l'essai proposé est de disposer d'un jeu de données permettant de relier des dommages quantitatifs et qualitatifs à des dynamiques de dégâts.

Cet essai devra être implanté sur une parcelle aussi homogène que possible, pouvant être irriguée. Le rendement doit pouvoir être déterminé pour chaque parcelle élémentaire du dispositif. Il est donc essentiel que chaque parcelle élémentaire mesure au moins 30 m^2 (MESTRIES, 2018b). Chaque parcelle élémentaire pourra être composée d'un minimum de 6 rangs. La densité de peuplement recherché sera de l'ordre de 6,5 plantes par m². Concernant les hybrides de tournesol, trois variétés aussi sensibles que possible au sclérotinia seront choisies avec des rendements potentiels différents. Le catalogue variétal ne propose pas de variétés sensibles au sclérotinia, les variétés les moins résistantes sont classées « assez sensible ». Cependant, les entreprises semencières peuvent être sollicitées pour trouver de vieilles variétés sensibles encore en stock, et les mettre à disposition pour cette expérimentation. Ces dernières doivent avoir la même classe de précocité pour faciliter la contamination artificielle. Afin de s'assurer du développement de la maladie, il faudra procéder à un apport d'inoculum. La contamination artificielle sera réalisée lors de la floraison (début juillet) grâce à la pulvérisation d'ascospores en suspension sur chaque capitule. Dans cet essai, cinq niveaux d'incidence seront considérés : 0%, 25%, 50%, 75% et 100%. Les ascospores se développent dans un environnement humide. L'irrigation de l'essai va favoriser la germination des ascospores pulvérisées sur les capitules. Pour ce faire, des sprinklers peuvent recouvrir l'ensemble du dispositif pour maintenir les plantes humides. La période d'irrigation devra s'étaler du début de la floraison jusqu'à fin floraison avec au minimum 72 heures consécutives par semaine (LASSALVY, 2016).

L'expérimentation envisagée comportera donc 15 traitements (3 variétés fois 5 niveaux d'incidence). Le dispositif comportera au moins 3 blocs et l'on pourra mettre en place un plan d'expérience en blocs complets randomisés (Figure 18). Aucune raison théorique n'impose de placer les blocs les uns à côté des autres. Cependant lorsqu'un gradient est connu ou présumé dans une direction donnée, les blocs doivent être disposés dans le sens de cette variation (VILAIN, 1999).

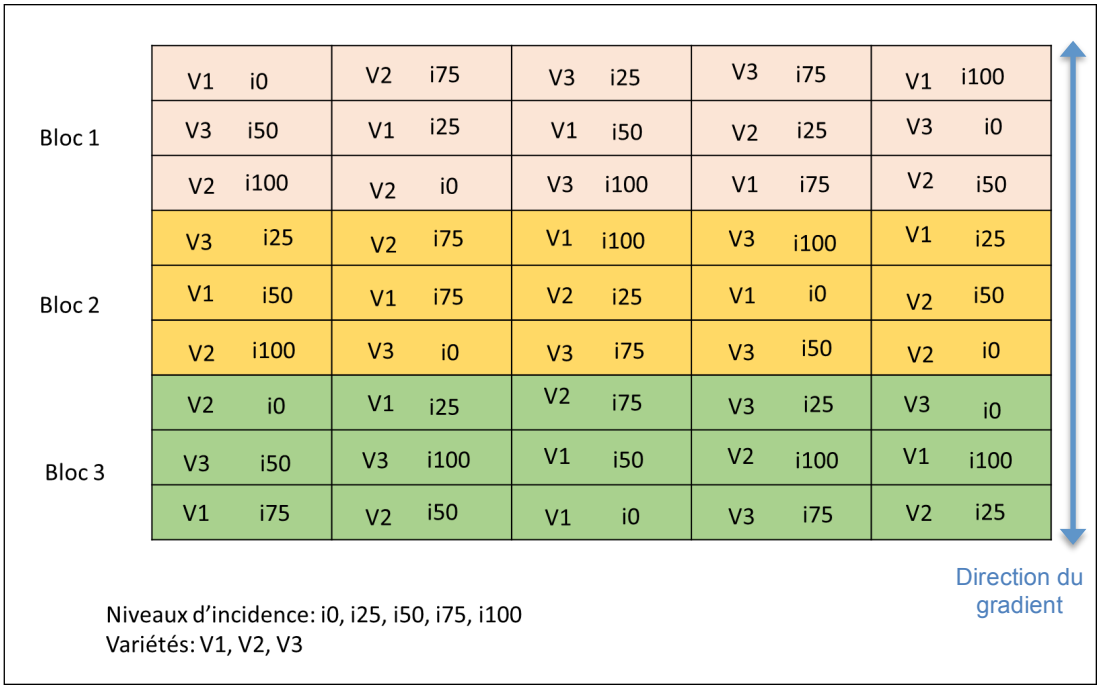


Figure 18. Proposition de plan d'expérience pour analyser la nuisibilité du sclérotinia du capitule (plan en blocs aléatoires complets: 15 traitements répartis dans 3 blocs). Chaque rectangle représente une parcelle élémentaire

Les symptômes sur capitule vont s'exprimer un mois après la floraison, c'est-à-dire début août en général. Au sein de chaque parcelle élémentaire, seules les quatre rangées du milieu seront notées afin de limiter les éventuels effets de bord. Autrement dit, pour chaque parcelle élémentaire, le nombre de plantes à noter est égal à 130. Le nombre de plantes atteintes va être noté et l'incidence va être calculée. Les deux rangs du bord serviront de tampon entre les parcelles élémentaires. De plus, pour le sclérotinia sur capitule, il n'y a pas de contamination secondaire par les ascospores présentes sur les capitules. De ce fait, il y a très peu de chance que les parcelles élémentaires inoculées contaminent les parcelles voisines. Les interactions entre parcelles élémentaires pourront donc être considérées comme négligeables. Les maladies doivent être notées depuis l'apparition des symptômes, c'est-à-dire début août jusqu'à la récolte, en septembre. Chaque semaine, la notation de l'ensemble des plantes sera effectuée. Au mois de septembre, l'ensemble de l'essai sera récolté et le rendement et la teneur en huile moyenne seront déterminés pour chaque parcelle élémentaire. Comme pour la notation de maladies, seuls les quatre rangs du milieu seront récoltés. Les parcelles élémentaires avec un niveau d'infestation de 0% serviront de témoin sans maladie pour évaluer les pertes de rendement due au sclérotinia du capitule.

L'avantage de ce dispositif expérimental est que les données recueillies seront adaptées aux besoins de l'ajustement de la fonction de dommage du sclérotinia capitule proposée dans le modèle SUNFLOWERPEST, et qu'une fonction de dommage qualitative (altération de la teneur en huile) pourra être proposée.

Amélioration du modèle SUNFLOWERPEST

Les nouvelles connaissances sur la nuisibilité de différents bioagresseurs du tournesol pourront être intégrées dans le modèle SUNFLOWERPEST au fur et à mesure.

Néanmoins, on pourrait envisager une amélioration du modèle à court terme. En effet, afin de faciliter son utilisation, le modèle SUNFLOWERPEST propose actuellement trois dynamiques de RUE par défaut si l'utilisateur n'est pas en mesure ce renseigner cette variable d'entrée difficile à mesurer. On pourrait remplacer le fichier d'entrée à fournir pour décrire l'évolution de la RUE par un module permettant de simuler des dynamiques de RUE en fonction du génotype, du sol, et de la conduite de culture. Le modèle SUNFLO (CASADEBAIG et al, 2011) est un modèle dynamique de croissance d'une culture de tournesol. Il permet de prédire le rendement et la teneur en huile des graines mais également la variable RUE en fonction du sol et du climat, de la variété, des pratiques culturales et de différents stress (hydrique, azoté, thermique ; CASADEBAIG et al, 2011). Un plan de simulation permettrait de générer un ensemble de données *in silico*, permettant de relier des variables décrivant le sol, la variété, les pratiques culturales, et différents stress (hydrique, azoté, thermique) à différentes dynamiques de RUE. La structure même du modèle SUNFLOWERPEST pourrait être revue afin de remplacer la variable RUE, difficile à renseigner, par des variables plus faciles d'accès, par l'intégration d'un module développé à l'aide du modèle SUNFLO.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACIMOVIC M., 1986. The effect of *Phomopsis* sp. Infection on grain yield and oil content of sunflower plants. *Helia*, 9, pp. 73-76.

AGRESTE., 2016. Les traitements phytosanitaires en 2014. *Les dossiers,* 36, pp. 5-20.

ALLEGRE A., 2015. Intégration des stress biotiques dans la modélisation des interactions génotype x environnement x conduite de culture pour une production intégrée du tournesol. Mémoire Master Sciences de l'Environnement Terrestre. Aix-en-Provence : Université Aix-Marseille, 53 p.

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, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. *Plos One*, pp.1-12.

BAEYAERT A., 2012. Etude sur l'extension et la lutte contre *l'Orobanche cumana* en France. Mémoire de fin d'étude. Toulouse : Ecole d'ingénieurs de Purpan, 116 p.

BERTERO DE ROMANO, A., VASQUEZ A., 1987. *Verticillium dahliae* Kleb, Estimación de pérdidas de rendimiento para distintas intensidades de ataque. *El girasol*, 10, pp. 380-383.

BERTERO DE ROMANO, A., VASQUEZ A., PIUBELLO S., SALA C., 1994. Quantifying the relationship between verticillium wilt intensity and yield loss of sunflower (*Helianthus annuus L.*), and feasibility of utilizing the hypodermic inoculation technique as a selection method. *Helia*, 20, pp. 49-54.

BORDAT A., DEBAEKE P., DECHAMP G., MESTRIES E., SEASSAU C., VINCOURT P., 2011. Phoma et dessèchement précoce du tournesol. Les points techniques du Cetiom. Paris : Edition CETIOM, 53 p.

CARSON M.L., 1991. Relationship between Phoma black stem severity and yield losses in hybrid sunflower. *Plant Disease*, 75, pp. 1150-1153.

CASADEBAIG P., GUILIONI L., LECOEUR 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., ESRAGNAT A., JOUFFRET P., LAGARDE F., MESTRIES E., PENAUD A., PINOCHET X., 2002. Les maladies du tournesol : Point Technique CETIOM. Paris : Editions Cetiom, 72 p.

COSTA A, 2018. Analyse et modélisation de la nuisibilité des principaux bioagresseurs du tournesol. Développement du modèle Sunflowerpest. Mémoire de fin d'études. Ecole d'Ingénieurs de Purpan, 83 p.

CREUS C., BAZZALO M.E., GRONDONA M., ANDRADE F., LEON A.J., 2007. Disease expression and ecophysiological yield components in sunflower isohybrids with and without *Verticillium dahliae* resistance. *Crop Science*, 47, pp. 703-710.

DEBAEKE P., ESTRAGNAT A., REAU R., 2003. Influence of crop management on sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi*). *Agronomie*, 23, pp. 581-592.

DEBAEKE P., ESTRAGNAT A., 2009. Crop canopy indicators for the early prediction of Phomopsis stem canker (*Diaporthe helianthi*) in sunflower. *Crop protection,* 28, pp. 792-801.

DEBAEKE P., BEDOUSSAC L., BONNET C., BRET MESTRIES, E., SEASSAU C., GAVALAND A., RAFAILLAC D., TRIBOUILLOIS H., VERICEL G., JUSTES E., 2017. Sunflower crop: environmental-friendly and agroecological. *OCL*, 36, pp. 1-12.

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, pp. 50-60.

DEBAEKE P., CASADEBAIG P., MESTRIES E., PALLEAU J.P., SALVI F., BERTOUX V., UYTTEWAAL V., 2011. Simulation dynamique des interactions génotype x environnement x conduite de culture : application à l'évaluation variétale en tournesol, *Innovations Agronomiques,* 15, pp. 89-103.

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, pp. 63-75.

DIAZ FRANCO, A., ORTEGON MORALES, A., 1997. Influence of sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi*) on seed quality and yield during seed development. *Helia*, 26, pp. 57-62.

DONALD P.A., VENETTE J.R., GULYA T.J., 1987. Relationship between *Phoma macdonaldii* and premature death of sunflower in North Dakota. *Plant Disease*, 71, pp. 466-468.

DORRELL D.G., HUANG H.C., 1978. Influence of Sclerotinia Wilt on Seeds Yield and Quality of Sunflower Wilted at Different Stages of Development. *Crop Science*, 18, pp. 974-976.

GAROFALO P., RINALDI M., 2015. Leaf gas exchange and radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in response to different deficit irrigation strategies: From solar radiation to plant growth analysis. *European Journal of Agronomy,* 64, pp. 88-97.

GASCUEL Q., MARTINEZ Y., BONIFACE M.C., VEAR F., PICHON M., GODIARD L., 2015. The sunflower downy mildew pathogen *Plasmopara halstedii*. *Molecular plant pathology*, 16, pp. 109-122.

GRENZ J.H., ISTOC V.A., MANSHADI A.M., SAUERBORN J., 2008. Interactions of sunflower (*Helianthus annuus*) and sunflower broomrape (*Orobanche cumana*) as affected by sowing date, resource supply and infestation level. *Field Crop Research*, 107, pp. 170-179.

GULYA T.J., VICK B.A. 1989. Sclerotinia head rot of sunflower in North Dakota: 1986. Incidence, effect on yield and oil components, and sources of resistance. *Plant Disease*, 73, pp. 504-507.

HAMMOUD M., 2014. Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles et de la situation de production sur deux maladies majeures du tournesol (*Helianthus annuus L.*) : le mildiou (*Plasmopara halsetdii*) et la pourriture blanche du capitule (*Sclerotinia sclerotiorum*). Mémoire ingénieur. Toulouse : ENSAT 106 p.

JESTIN C., MARTIN MONJARET, C., 2016. *Orobanche cumana*, opter pour la bonne stratégie de lutte. *Perspectives Agricoles*, 430, pp. 28-31.

JOUFFRET P., LABALETTE F., THIBIERGE J., 2011. Atouts et besoins en innovations du tournesol pour une agriculture durable. *Innovations Agronomiques*, 14, pp. 1-17.

GIBOT-LECLERC S., 2004. Etude épidémiologique, écophysiologique et agronomique du couple *Orobanche ramosa* L. / *Brassica napus*. Thèse de doctorat, Université Paris VI.

GRENZ J.H., MANSCHADI A.M., DEVOIL P., MEINKE H., SAUERBORN J., 2005. Assessing strategies for Orobanche sp. control using a combined seed bank and competition model. Agronomy Journal, 97:1551-1559.

KADRYH A.E., TEWFIC H., 1956. Seed germination in *Orobanche crenata* Forsk. Svensk Botanisk Tidskrift 50: 270-286.

LASSALVY S., 2016. Protocole GEVES d'Expérimentation Tournesol : essais maladie Sclérotinia du capitule Version en vigueur pour la campagne 2016, 16 p.

LE CRENN, P., 2016. De nouvelles pistes génétiques pour conférer la résistance à l'orobanche du tournesol. *INRA Science&Impact* [en ligne]. Disponible sur : http://www.inra.fr/Entreprises-Monde-agricole/Resultats-innovation-transfert/Toutes-les-actualites/orobanche-tournesol (consultée le 07/09/2017).

LECOEUR J., POIRE LASSUS, R., CHRISTOPHE A., PALLAS B., CASADEBAIG P., DEBAEKE P., VEAR F., GUILIONI L., 2011. Quantifying physiological determinants of genetic variation for yield potential in sunflower. SUNFLO: A model-based analysis. *Functional Plant Biology,* 38, pp. 246-259.

MASIREVIC S., GULYA T.J., 1992. Sclerotinia and Phomopsis- two devastating sunflower pathogens. *Field Crop Research*, 30, pp. 271-300.

MASSIGNAM A.M., CHAPMAN S.C., HAMMER G.L., FUKAI S., 2009. Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply. *Field Crops Research,* 113, pp. 256-267.

MESTRIES E., 2013. Lutter contre le verticillium grâce aux variétés. *Perspectives agricoles*, 406, pp. 24-28.

MESTRIES E., 2018a. Maladies du tournesol. Quantifier la nuisibilité du *Verticillium*. *Perspectives Agricoles,* 455, pp. 30-34.

MESTRIES E., 2018b. Chargée d'étude en phytopathologie de l'institut technique Terres Inovia. Interview réalisée le 23/04/2018.

MONTEITH J.L., MOSS C.J., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain [and Discussion]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B. *Biological Sciences,* 281, pp. 277-94.

NEUBAUER C., HEITMANN B., MULLE C., 2014. Biofumigation potential of Brassicaceae cultivars to *Verticillium dahliae*. European Journal of Plant Pathology 140: 341-352. https://doi.org/10.1007/s10658-014-0467-9

PARKER C., RICHES C.R., 1993. Parasitic weeds of the world: Biology and control. CAB Int., Wallingford, UK.

PENAUD A., MICHI H., 2009. *Coniothyrium minitans*, un agent de lutte biologique au service de la protection intégrée. *OCL*, 16, pp. 158-163.

PINOCHET X., ESTRAGNAT A., 1996. Field evaluation of hybrid sensitivity to *Diaporthe helianthi:* relationship between symptoms and yield losses. *Plant Pathology,* 20, pp. 777-780.

QUIROZ F.J., EDWARDS MOLINA, J.P., DOSIO G.A., 2014. Black stem by *Phoma macdonaldii* affected ecophysiological components that determine grain yield in sunflower (*Helianthus annuus L.*). *Field Crop Research*, 160, pp. 31-40.

SARRON J., BRUN F., CASADEBAIG P., ROLLET P., MESTRIES E., DEBAEKE P., 2016. Diagnostic agronomique des évolutions de rendements du tournesol en France. Grande Culture GCHP2E [en ligne]. Disponible sur : file:///C:/Users/Amaia/Downloads/Reporting+GC+HP2E_debaeke_def_9janv.pdf (consultée le 11/04/18).

SEASSAU C., MESTRIES E., DEBAEKE P., DECHAMP GUILLAUME, G., 2010. Phoma du tournesol et dessèchement précoce: point sur les avancées de la recherche. *Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 3, pp. 157-160.

STERN V.M., Smith R. F., van den Bosch R., Hagen K. S., 1959. The integrated control concept. Hilgardia, 29: 81-101.

TERRES INOVIA., 2017a. Atouts agronomiques et environnementaux [en ligne]. Disponible sur : http://www.terresinovia.fr/tournesol/cultiver-du-tournesol/atouts-points-cles/atouts-agronomiques-et-environnementaux/ (consulté le 22/08/17).

TERRES INOVIA., 2017b. Phomopsis : attaques et reconnaissance [en ligne]. Disponible sur : http://www.terresinovia.fr/tournesol/cultiver-du-tournesol/maladies/phomopsis/attaques-et-reconnaissance/print.pdf?print=1 (consulté le 22/06/17).

TERRES INOVIA., 2017c. Sclérotinia du capitule [en ligne]. Disponible sur : http://www.terresinovia.fr/tournesol/cultiver-du-tournesol/maladies/sclerotinia/sur-capitule/ (consulté le 22/06/17).

TERRES INOVIA., 2017d. Tournesol : Orobanche cumana [en ligne]. Disponible sur : http://www.terresinovia.fr/tournesol/cultiver-du-tournesol/orobanche-cumana/ (consulté le 06/09/17).

TOURVIEILLE DE LABROUHE, D., PILORGE E., NICOLAS P., VEAR F., 2000. Le mildiou du tournesol. Versailles : Editions INRA et CETIOM, 176 p.

TRAPANI N., HALL A.J., SADRAS V.O., VILLELA F., 1992. Ontogenetic changes in radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop. *Field Crops Research,* 29, pp. 301-316.

VEDY-ZECCHINI, M.A., 2016. Développement et optimisation de modèles pour une production intégrée du tournesol. Mémoire de fin d'études. Toulouse : Université Paul Sabatier, 39 p.

VILAIN M., 1999. Méthodes expérimentales en agronomie. Pratiques et analyse. Paris : Editions TEC & DOC, 338 p.

VINCOURT P., AS SADI, F., VEAR F., BORDAT A., TOURVIEILLE DE LABROUHE, D., GODIARD L., 2011. La tolérance du tournesol aux maladies. *Innovations Agronomiques*, 14, pp. 109-121.

WALLACH D., MAKOWSKI D., JONES J.W., 2006. Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parameterization and Applications. Oxford: Elsevier, 449p.

WILLOCQUET L., SAVARY S., FERNANDEZ L., ELAZEGUI F.A., CASTILLA N, ZHU D., TANG D., HUANG S., LIN X., SINGH H.M., SRIVASTAVA R.K., 2002. Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia. Ecological Modelling. 153. 247-268.

WILLOCQUET L., AUBERTOT J.N., LEBARD S., ROBERT C., LANNOU C., SAVARY S., 2008. Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research*, 107, pp. 12-28.

ANNEXE 1. Description du modèle SUNFLOWERPEST telle que générée par la plateforme ModelBuilder

SUNFLOWERPEST

Modèles

Nom	Description
ModelDVS	This model computes thermal time and phenological stages
ModelRG	This model computes daily crop growth rate
ModelLeaf	This model computes leaf biomass and Leaf Area Index
Capitulum	This model computes capitulum biomass
Root	This model computes root biomass
Verticillium	Verticillium dahliae
Seed	This model computes seed biomass
Stem	This model computes stem biomass
Phomopsis	Diaporthe helianthi
Phoma	Phoma macdonaldii
Sclerotinia	Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) de Bary pest
Orobanche	Orobanche cumana
Mildew	Plasmopara halstedii
ModelMeteo	This model provides daily weather data

Paramètre

Nom	Unité	Description	Valeur du paramètre	Modélisation
Tbase	°C	Base temperature below which growth or development does not occur	4.8	ModelDVS
dt	day	dt	1.0	ModelRG
k	Dimensionless	Light extinction coefficient	0.948	ModelRG
ec	Dimensionless	ec	0.48	ModelRG
dt	day	dt	1.0	ModelLeaf
alpha	Dimensionless	alpha	1.0	Verticillium
alpha	Dimensionless	Alpha is a shape parameter of the relationship	0.5	Phomopsis
alpha	Dimensionless	Alpha is a shape parameter of the relationship	1.0	Phoma
alpha2	Dimensionless	Alpha2 is a shape parameter of the relationship	1.0	Sclerotinia
alpha1	Dimensionless	Alpha1 is a shape parameter of the relationship	40.0	Sclerotinia
c	m2.g-1	c	0.0043	Orobanche
alpha	Dimensionless	Alpha is a shape parameter of the relationship	1.0	Mildew

Paramètre

Nom	Unité	Description	Fichier	Temps	Modélisation
DVS	Dimensionless	Development stage (=f(STEMP)) (0 = Emergence, 1 = Flowering, 2 = Maturity)	DVS_mitardive_base4.8.txt	STEMP	ModelDVS
RUE	g.MJ-1	Radiation Use Efficiency (=f(DVS))	RUEm.txt	DVS	ModelRG
CPL	Dimensionless	Coefficient of assimilate partitioning towards leaves (=f(DVS))	CPL.txt	DVS	ModelLeaf
RRSENL	day-1.m-2	Daily relative rate of leaf senescence (=f(DVS))	RRSENL.txt	DVS	ModelLeaf
SLA	m2.g-1	Specific Leaf Area (=f(DVS))	SLA23112016_0.0147.txt	DVS	ModelLeaf
CPC	Dimensionless	CPC	CPC.txt	DVS	Capitulum
CPR	Dimensionless	CPR	CPR.txt	DVS	Root
SEVERITYverti	Dimensionless	Average of % of necrosed foliage per plant (Creus et al, 2007)	severity_0_Date.txt	DATE	Verticillium
CPG	Dimensionless	CPG	CPG.txt	DVS	Seed
CPS	Dimensionless	CPS	CPS.txt	DVS	Stem
SEVERITYphomo	Dimensionless	% of plants with encircled symptoms in stem	Severity_0_phomo_Date.txt	DATE	Phomopsis
SEVERITYphoma	Dimensionless	% of plants with premature ripening	severity_0_DVS_phoma.txt	DVS	Phoma
SEVERITYsclero_capitule	Dimensionless	% of plants with head rot	Severity_control.txt	DATE	Sclerotinia
SEVERITYsclero_collet	Dimensionless	% of wilted plants	Severity_control.txt	DATE	Sclerotinia
BM_Orobanche	g.m-2	Orobanche biomass	BM_oro_0.txt	DATE	Orobanche
SEVERITYmildew	Dimensionless	% of plants with downy mildew	severity_0_DVS_mildiou.txt	DVS	Mildew

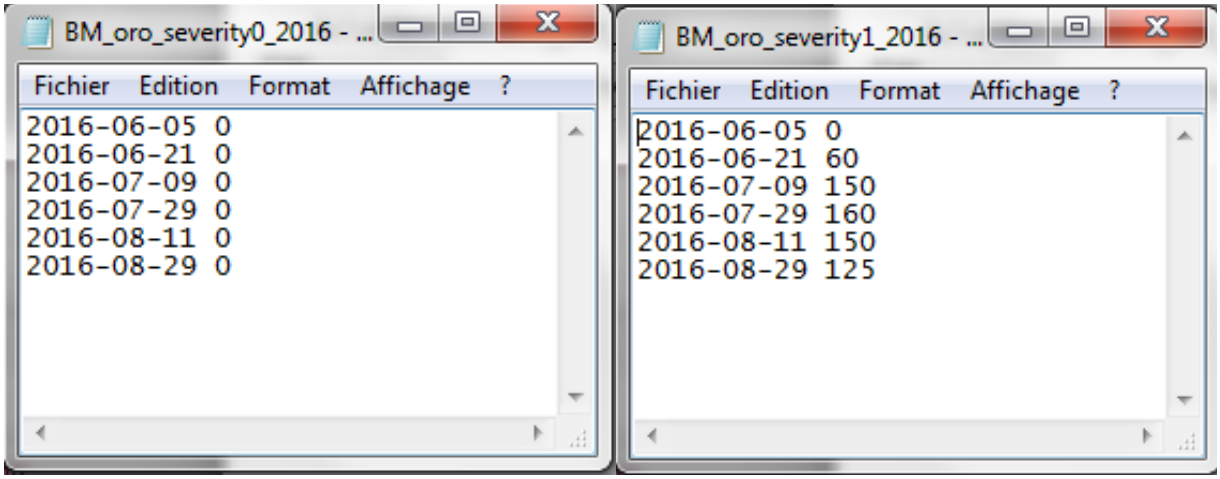
Variables Climatiques(Fichier Climat. : rad1998bis.txt)

Nom	Unité	Description	Nom de la colonne
RAD	MJ.m-2.day-1	Daily global incoming solar radiation	Global radiation
Tmax	°C	Maximum daily temperature	Tmax
Tmin	°C	Minimum daily temperature	Tmin

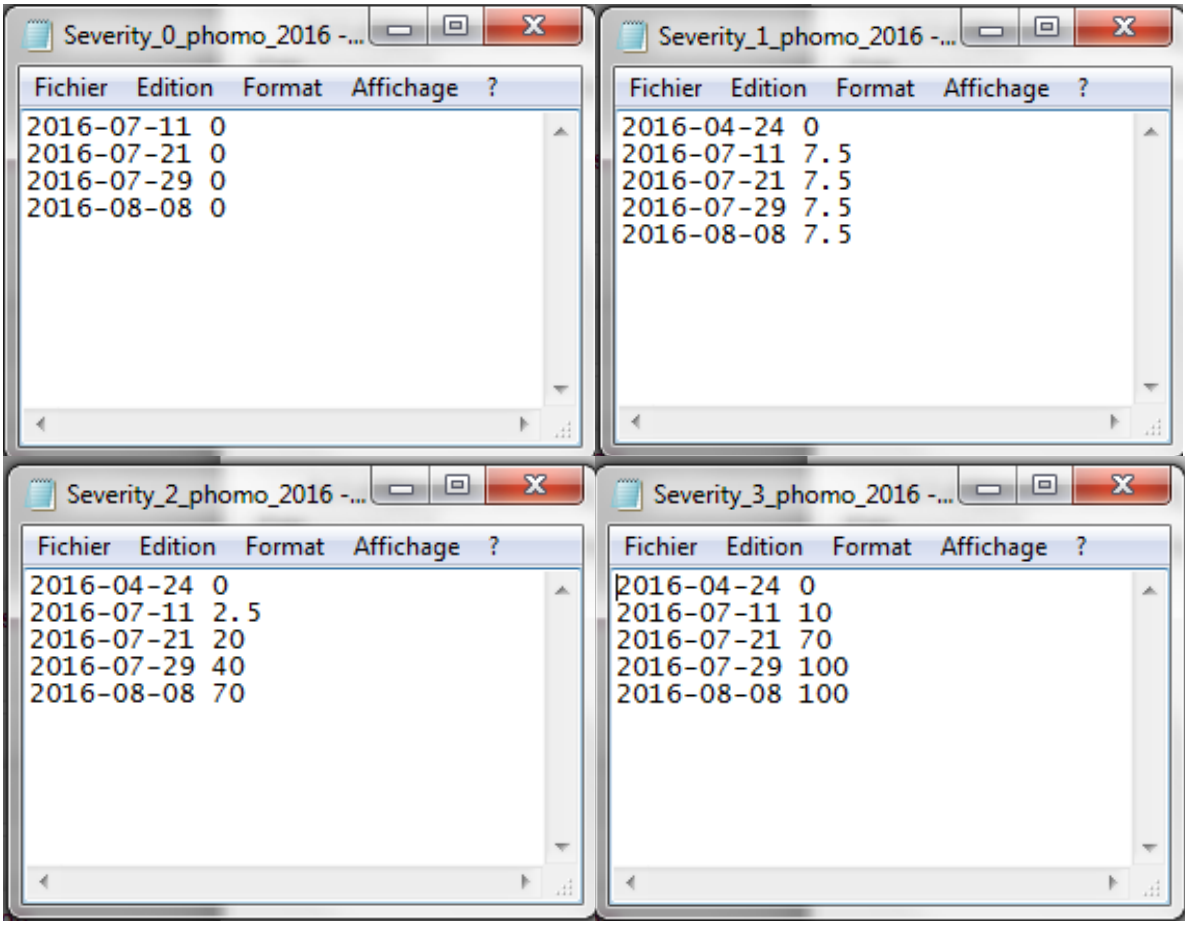
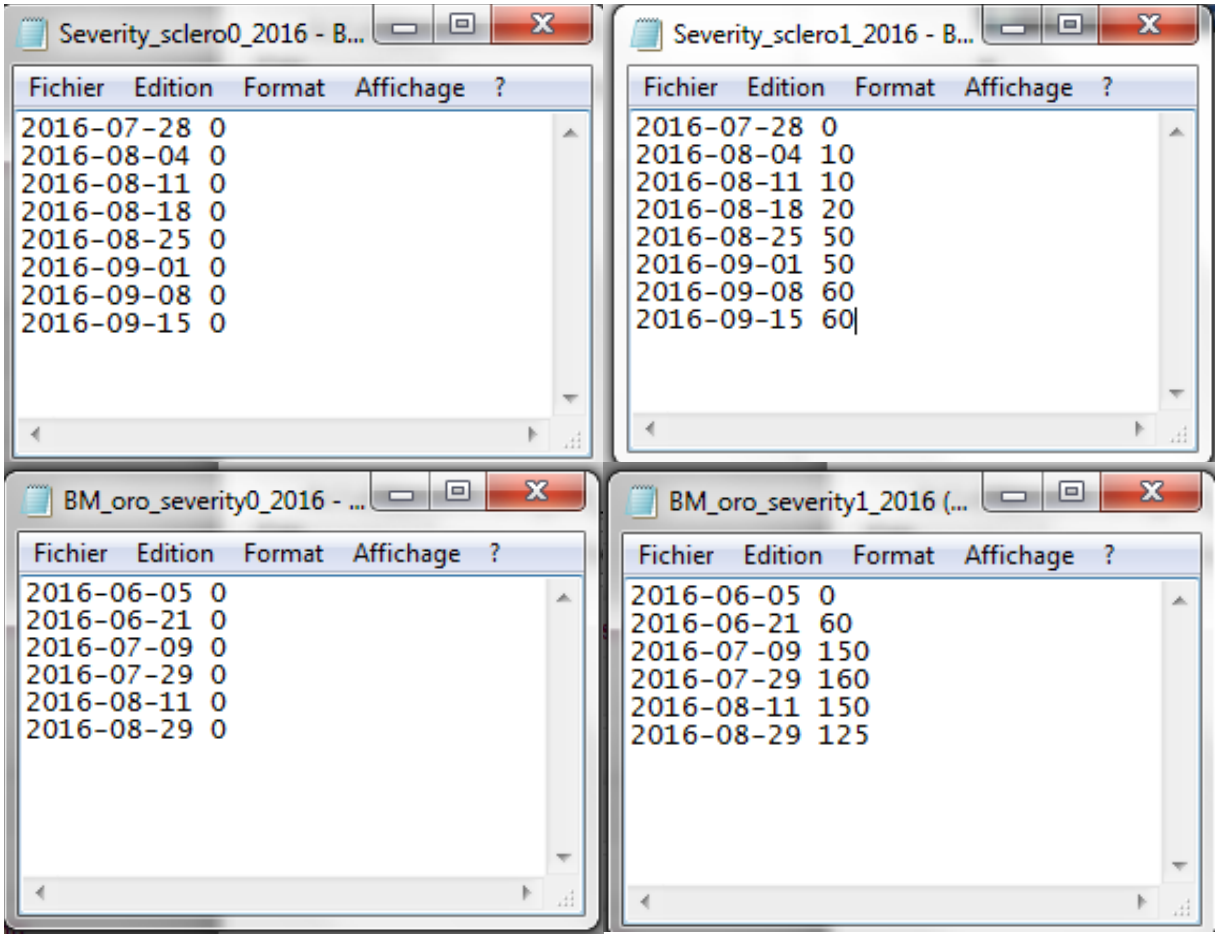
Variables

Nom	Unité	Description	Expression	Modélisation
DTEMP	°C	Daily mean temperature	max(0, ((Tmin+Tmax)/2)-Tbase)	ModelDVS
STEMP	°C.day	Thermal time	STEMP(-1) + DTEMP(-1)	ModelDVS
RG	g.m-2	Daily rate of growth computed with Monteith equation	(ec*RAD*RUE*RFphomopsis*RFphoma*RFsclero_collet*RFsclero_capitule*RFmildew*RForobanche*(1-exp(-k*LAI)))*dt	ModelRG
BM_Leaf	g.day-1.m-2	Cumulated dry biomass of leaves	BM_Leaf(-1)+(CPL*RG(-1)-RSENL)*dt	ModelLeaf
LAI	m2.m-2	Leaf Area Index	(BM_Leaf*SLA)*RFverti	ModelLeaf
RSENL	g.day-1.m-2	Daily rate of physiological leaf senescence	RRSENL*BM_Leaf(-1)	ModelLeaf
BM_Capitulum	g.m-2	Capitulum biomass	BM_Capitulum(-1)+RG(-1)*CPC	Capitulum
BM_Roots	g.m-2	Root biomass	BM_Roots(-1)+RG*CPR	Root
RFverti	Dimensionless	Verticillium reduction factor	(1-SEVERITYverti/100)^(alpha)	Verticillium
BM_Seeds	g.m-2	Seed biomass	BM_Seeds(-1)+RG(-1)*CPG	Seed
BM_Stem	g.m-2	Stem biomass	BM_Stem(-1)+RG(-1)*CPS	Stem
RFphomopsis	Dimensionless	Phomopsis reduction factor	(1-SEVERITYphomo/100)^alpha	Phomopsis
RFphoma	Dimensionless	Phoma reduction factor	(1-SEVERITYphoma/100)^alpha	Phoma
RFsclero_capitule	Dimensionless	Sclerotinia head rot reduction factor	(1-SEVERITYsclero_capitule/100)^alpha2	Sclerotinia
RFsclero_collet	Dimensionless	Sclerotinia wilt reduction factor	(1-SEVERITYsclero_collet/100)^alpha1	Sclerotinia
RForobanche	Dimensionless	Orobanche cumana reduction factor	exp(-c*BM_Orobanche)	Orobanche
RFmildew	Dimensionless	Mildew reduction factor	(1-SEVERITYmildew/100)^alpha	Mildew

ANNEXE 2. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 1 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (cas avec un seul bioagresseur, l'orobanche)



ANNEXE 3. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 2 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (cas avec un seul bioagresseur, le phomopsis, mais avec plusieurs dynamiques de dégâts)



ANNEXE 4. Dynamiques de dégâts utilisées pour l'exemple 3 d'utilisation du modèle SUNFLOWERPEST (deux bioagresseurs en interaction : le sclérotinia au collet et l'orobanche)