



HAL
open science

Des outils de raisonnement pour limiter et rendre durable la lutte chimique contre les bioagresseurs en grandes cultures

A. Penaud, P. Printz, C. Maumené, Anne Sophie A. S. Walker, D. Gouache, Bertrand Ney, X. Pinochet

► To cite this version:

A. Penaud, P. Printz, C. Maumené, Anne Sophie A. S. Walker, D. Gouache, et al.. Des outils de raisonnement pour limiter et rendre durable la lutte chimique contre les bioagresseurs en grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, 2011, 17, pp.1-14. 10.17180/xz4y-vq72 . hal-01019830

HAL Id: hal-01019830

<https://hal.science/hal-01019830>

Submitted on 29 May 2020

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

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



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

Des outils de raisonnement pour limiter et rendre durable la lutte chimique contre les bioagresseurs en grandes cultures

Penaud A.¹, Printz P.², Maumené C.³, Couleaud G.³, Walker A.S.⁴, Gouache D.⁵, Ney B.⁶, Pinochet X.¹

¹ CETIOM, avenue L. Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

² AFPP, 42 rue R. Jaclard, 94140 Alforville

³ Arvalis – Institut du végétal, station expérimentale, 91720 Boigneville

⁴ INRA UMR 1290 Bioger-CPP, Bât 13, avenue L. Brétignières, BP01, 78850 Thiverval-Grignon

⁵ Arvalis – Institut du végétal, IBP, Université Paris Sud, rue de Noetzelin, Bât 630, 91405 Orsay

⁶ AgroParisTech – INRA UMR1091- EGC, 78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : penaud@cetiom.fr

Résumé

Le développement en grandes cultures de populations de bioagresseurs résistantes nécessite de limiter le recours systématique à la lutte chimique et de préserver l'efficacité des substances actives autorisées. Leur usage raisonné est basé sur une bonne connaissance des populations de bioagresseurs, grâce à des réseaux de surveillance spécifiques septoriose du blé et sclérotinia du colza, et la conception d'outils d'aide à la décision. Des tests précoces de diagnostic moléculaire offrent une mesure du potentiel infectieux utile dans la conception d'OAD. Pour la septoriose, maladie à incubation lente, une quantification fongique permet une prédiction du développement ultérieur des symptômes. En sclérotinia, la quantification d'ADN d'un échantillon de 40 fleurs n'est malheureusement pas corrélée à l'indicateur de risque « pourcentage de fleurs contaminées ». Pour la septoriose du blé, la conception d'un modèle épidémiologique opérationnel SeptoLIS, intégrant les facteurs de variations climatiques et phénologiques, permet de se rapprocher du positionnement idéal du premier traitement fongicide. De plus, la modélisation des interactions Hôte x agents pathogènes du blé décrivant l'évolution de la plante et permettant d'évaluer l'impact d'une maladie sur le couvert constitue un outil innovant de conception d'itinéraires techniques permettant de minimiser voire d'échapper à une attaque parasitaire.

Mots-clés : blé, colza, *Septoria tritici*, *Sclerotinia sclerotiorum*, résistances aux pesticides, diagnostics précoces qPCR, OAD, modèles épidémiologiques et 3D

Abstract: Tools to reduce and to improve a sustainable chemical control against the diseases of wheat and rapeseed

Development of resistant pest populations in grain crops requires to limit systematic use of chemical control and to preserve effectiveness of authorized active substances. Their rational use is based on a good understanding of pest population biology using specific monitoring networks and designing decision support tools (DST), targeting for instance *Septoria* in wheat and *sclerotinia* in rapeseed. Early molecular diagnostic tests provide a measurement of the potential infectivity in the design of DST. For *Septoria*, fungus disease with a slow incubation, a fungal quantification makes it possible a prediction of the further symptoms development. In *Sclerotinia* quantification of DNA from a sample of 40 flowers is unfortunately not correlated to a risk indicator: "percentage of contaminated flowers". For the wheat *Septoria*, an operational epidemiological model SeptoLIS, incorporating the changes in climate and phenological factors, enables to reach the ideal positioning of the first fungicide treatment. Moreover, modelling interactions host x pathogens of wheat describing plant changes and assessing potential

disease impact on the sward is an innovative tool of design of technical routes to minimize or even escape a pest attack.

Keywords: wheat, rapeseed, *Septoria tritici*, *Sclerotinia sclerotiorum*, resistance to pesticides, early diagnostics qPCR, decision support tools, epidemiological and 3D models

Introduction

Ces dernières décennies, la lutte contre les bioagresseurs en grandes cultures a, le plus souvent, eu recours à des solutions chimiques qui, lorsqu'elles ont été reconnues particulièrement efficaces, ont exercé par leur emploi systématique et excessif une pression de sélection et le développement de populations résistantes de bioagresseurs. De telles pratiques sont aujourd'hui remises en cause par les directives du Grenelle de l'Environnement et le renforcement de la réglementation en matière d'homologation des spécialités agro-pharmaceutiques qui conduit à une réduction du nombre disponible de molécules autorisées.

Afin de limiter le recours systématique à la lutte chimique et préserver l'efficacité des substances actives autorisées, l'usage raisonné des produits semble la meilleure voie pour assurer une protection durable en grandes cultures. Cet usage raisonné passe d'une part par une bonne connaissance des populations de bioagresseurs et d'autre part par la conception et la mise au point d'outils de raisonnement des traitements, conduisant à des stratégies de protection plus respectueuses de l'environnement et capables ainsi de répondre aux enjeux agro-environnementaux du plan Ecophyto 2018.

Le projet a reposé sur un partenariat entre CETIOM, AFPP, ARVALIS-Institut du végétal et son réseau « Performance » étendu aux chambres d'Agriculture, INRA BIOGER-CPP, INRA EGC. Il a largement bénéficié d'un développement de synergies entre recherche scientifique et technique favorisées par la proximité des équipes regroupées dans l'UMT Pivert de Grignon de «Gestion durable des résistances du blé et du colza vis-à-vis des pathogènes et des insectes ».

Ce projet s'est articulé en quatre volets dont les objectifs étaient les suivants :

1. suivre précisément les phénomènes de résistance des bioagresseurs majeurs du blé et du colza aux différentes molécules ;
2. concevoir et améliorer des outils d'aide à la décision et d'aide au choix des produits à employer;
3. innover dans la conception d'itinéraires permettant de réduire l'impact des bioagresseurs sur la production agricole, en termes de quantité, qualité et sécurité alimentaire et environnementale;
4. contribuer à une meilleure information des agriculteurs et de leurs techniciens afin de les conduire à raisonner davantage leurs stratégies de protection des cultures en privilégiant les moyens non chimiques disponibles dans un cadre où leur mise en œuvre présente un bilan économique et énergétique acceptable.

1. La résistance des bioagresseurs du blé et du colza aux différentes molécules est en pleine évolution

Un état des lieux des résistances des principales maladies du blé et du colza aux différentes familles de fongicides utilisées a été réalisé chaque année ainsi qu'un bilan des résistances des méligèthes du colza aux insecticides. Ces bilans annuels permettent de suivre l'évolution de la problématique des

résistances des bioagresseurs aux pesticides et servent de base de communication pour promouvoir une utilisation raisonnée des substances actives autorisées afin d'éviter que n'apparaissent à court terme de nouvelles souches de bioagresseurs résistantes.

Le monitoring est réalisé par culture et par bioagresseur sur l'ensemble du territoire au sein de groupes de travail thématiques regroupés sous l'égide de l'AFPP. Chaque groupe définit un plan de prospection et de surveillance qui s'appuie également sur la mise en place d'un réseau d'essais mutualisé entre les SRAL (essais « érosion »), les instituts avec un partenariat important des chambres d'Agriculture et de firmes phytosanitaires. Ces réseaux servent en partie de support aux analyses réalisées aux laboratoires de l'INRA Bioger-CPP, de l'Anses et du Cetiom.

1.1 Un monitoring « Résistance sclérotinia » adapté à l'évolution des molécules

La gamme des fongicides autorisés pour lutter contre le sclérotinia du colza a subi entre 2006 et 2007 une importante évolution avec le retrait des produits appartenant aux familles des benzimidazoles et des imides cycliques. Il est apparu judicieux de reporter la surveillance sur les dernières substances actives autorisées : le boscalid pour la famille des dicarboxamides (SDHI), le prothioconazole pour la famille des triazoles (DMI) ainsi que l'azoxystrobine, seul représentant des strobilurines (QoI) jusqu'alors autorisé en colza (Moinard *et al*, 2009).

Les méthodes de détection des individus résistants à ces molécules ont été mises au point par l'INRA Bioger-CPP. Ces méthodes sont basées sur la croissance mycélienne de *S. sclerotiorum* sur milieu gélosé supplémenté par une dose discriminante de chacune des molécules. La source carbonée du milieu gélosé est à base de succinate de sodium pour détecter les isolats résistants au boscalid ou au prothioconazole et à base de glucose dans le cas de l'azoxystrobine. Dès qu'une première souche résistante au boscalid a été isolée, celle-ci a été introduite comme témoin de résistance. Ces méthodes mises en œuvre dans les laboratoires de l'Anses Lyon et du Cetiom ont permis en 3 ans l'analyse de près de 6500 isolats.

Au cours de ces 3 années, le réseau de surveillance complété du réseau de la firme détentrice du boscalid a permis de déceler en 2008 les premiers isolats résistants au boscalid. Il s'agit d'une détection ponctuelle, sans relation avec une pression exercée par la substance active, qui n'a d'ailleurs pas été redétectée l'année suivante. Quant aux triazoles et aux strobilurines, si quelques souches ont parfois présenté des comportements douteux, il n'a pas été mis en évidence de cas de résistance avérée.

1.2 Les résistances de la septoriose aux fongicides en progression

Au cours des deux premières années du projet, le réseau « Performance » d'Arvalis, impliquant 25 chambres d'Agriculture ainsi que des firmes et organismes stockeurs a permis la mise en place de 122 et 116 essais et la collecte sur ces essais de près de 2400 échantillons de septoriose (*Septoria tritici*). Le rapprochement des résultats des efficacités au champ avec ceux des analyses de résistance a permis d'orienter les conseils d'utilisation en termes de choix de produit (Couleaud *et al*, 2009).

Si la résistance aux strobilurines en 2007 est généralisée à l'ensemble du territoire à l'exception des régions les plus méridionales, en 2008 elle atteint le sud de la France et concerne dès lors l'ensemble des régions céréalières où l'efficacité de toutes les strobilurines se trouve fortement compromise.

Concernant la résistance aux triazoles, le déterminisme de cette résistance repose sur une ou plusieurs mutations associées ou non à une double délétion au niveau d'un seul gène (CYP51), codant pour le site d'action de la 14- α -déméthylase. C'est la combinaison des différentes mutations et délétion qui a conduit à identifier 8 phénotypes. Chaque phénotype TriR est caractérisé par sa sensibilité (CI₅₀) au pyrifénox, au triflumizole, au prochloraze, au triadiménol, au tébuconazole, au fluquinconazole, au

metconazole et à l'époxiconazole. Il est possible de regrouper ces phénotypes en trois sous-classes caractérisées respectivement par des niveaux de résistance faibles (TriLR), moyens (TriMR) et élevés (TriHR) vis-à-vis de la majorité des triazoles.

En 2007, on estimait à 73% la proportion des souches TriMR dans les populations de *S. tritici*. Cette proportion est passée à 78% en 2008 pour représenter jusqu'à 85% de la population en 2009.

Au niveau des phénotypes, cinq sont plus fréquemment représentés dans la plupart des régions ; il s'agit des TriR4 et TriR5 au sein des TriLR et des TriR6, TriR7 et TriR8 au sein des TriMR. Les souches TriR7 + Tri R8 (résistantes aux triazoles mais sensibles au prochloraze) sont plus fréquentes dans le sud-ouest et sur la façade atlantique tandis qu'ailleurs les souches TriR6 (légèrement résistantes au prochloraze) sont prédominantes.

Jusqu'à 2007 aucune souche de type TriHR n'a été détectée. En 2008, quelques rares souches potentiellement TriHR ont été décelées sur des milieux enrichis à des concentrations 50 à 250 fois supérieures au CI_{50} respectives de ces molécules. En 2009, la suspicion de souches TriHR s'est vue confirmée avec la détection des toutes premières souches fortement résistantes aux triazoles y compris au prochloraze.

S'agissant des carboxamides (boscalid) les premières analyses conduites en 2008 n'ont mis en évidence aucune souche résistante.

1.2.1 De la bonne gestion des solutions fongicides disponibles

Dans les essais du réseau, les solutions classiques comme triazole + prochloraze ou triazole + contact (chlorothalonil) soutiennent très largement la comparaison avec les spécialités à base de prothioconazole ou de boscalid. Elles peuvent d'ailleurs s'avérer économiquement plus rentables que les innovations.

Avec de bons résultats dans les secteurs où les phénotypes TriR7 et TriR8 prédominent, le prochloraze offre un pouvoir de « contre-sélection » des souches TriMR et s'affirme comme un partenaire très complémentaire d'OPUS, de BELL ou de JOAO doublé d'un excellent rapport qualité prix. Toutefois, l'émergence de TriHR invite à limiter son usage à un seul traitement par saison et à alterner les différents triazoles entre eux.

Afin de mieux gérer les résistances des bioagresseurs aux substances actives auxquelles est désormais confrontée la protection chimique, il y a nécessité de recourir à tous les moyens susceptibles d'optimiser la protection en passant par la conception d'outils d'aide à la décision.

2. Conception et tests d'outils d'aide à la décision de traiter

Ce volet du projet avait pour objectif d'améliorer des modèles épidémiologiques ou d'utiliser des tests biologiques afin d'estimer un risque qui puisse aboutir à un système d'aide à la décision de traiter ou non.

2.1 La PCR quantitative pour des tests précoces de potentiel infectieux

Cette piste a été travaillée tant sur blé pour la septoriose que sur colza pour la sclérotiniose.

2.1.1 De l'intérêt de la quantification de la septoriose par qPCR

Pour la septoriose du blé, maladie à incubation longue pouvant dépasser 4 semaines, la PCR quantitative (qPCR) peut permettre de quantifier le développement mycélien avant apparition des symptômes et d'envisager de remplacer une observation visuelle par une quantification fongique.

A partir d'essais mis en place en 2007 et 2008 faisant l'objet d'observations de symptômes à pas de temps régulier et d'une quantification de la biomasse fongique, il est montré une relation directe entre le nombre de copies d'ADN et les symptômes. Il s'avère ainsi que le nombre de copies d'ADN est un très bon indicateur de la présence/absence de symptômes (Gouache *et al*, 2009a).

L'évolution des quantités d'ADN en fonction des sommes de températures à partir de différentes origines de temps : semis, date d'émergence de l'étage foliaire étudié et date correspondant à l'apparition de la maladie sur l'étage étudié permet de tracer des cinétiques. En inversant les axes, le nombre de copies d'ADN devient une variable explicative et le temps entre la date du prélèvement et la date d'apparition de la maladie la variable prédictive. Grâce à la relation linéaire ainsi obtenue entre le résultat issu de la qPCR (exprimé en copies d'ADN) et l'intervalle de temps entre la date du prélèvement et la date d'apparition des symptômes (Figure 1), il apparaît possible de prévoir par le biais d'une quantification d'ADN fongique le développement ultérieur du champignon.

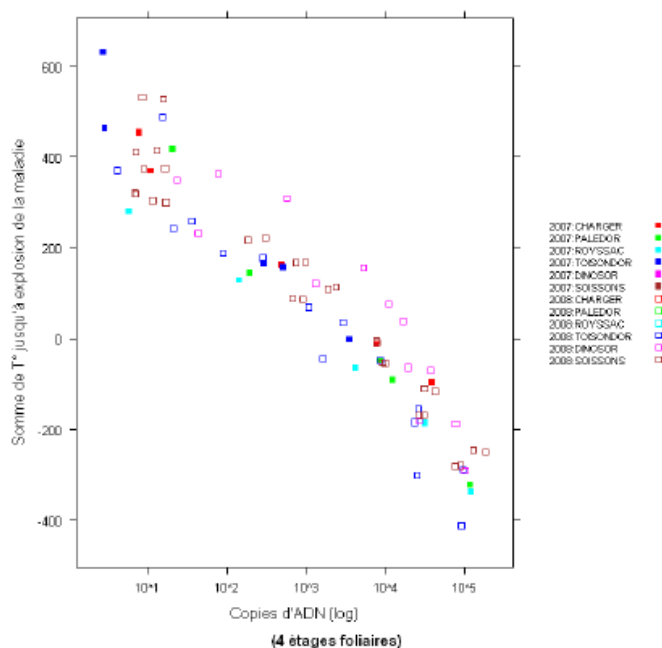


Figure 1 : Utilisation du nombre de copies d'ADN comme variable prédictive du temps entre la date du prélèvement et l'expression des symptômes.

Ces résultats montrent l'intérêt de la qPCR comme outil permettant une prédiction robuste du développement ultérieur des symptômes de septoriose et cette capacité prédictive de la qPCR ouvre ainsi une porte à son utilisation dans des schémas d'aide à la décision.

2.1.2 Test précoce d'infection des pétales de colza par sclérotinia : la substitution du kit pétales par une analyse en qPCR est-elle possible ?

Le taux de fleurs infectées par le sclérotinia au tout début de la floraison du colza est actuellement l'indicateur du risque sclérotinia à la parcelle le plus fiable (Penaud *et al*, 2009). Le test à grande échelle de cet indicateur a permis d'établir des règles de décision d'un traitement ou non ainsi que des règles de choix du fongicide dans l'objectif de gérer les familles chimiques et éviter l'émergence de souches de sclérotinia résistantes aux fongicides.

Cet indicateur de risque est déterminé par dépôt d'un échantillon de 40 fleurs sur milieu semi-sélectif en boîtes de Pétri et est appelé communément « kit pétales ».

Le test réalisé à grande échelle a permis l'acquisition de plus de 300 couples de données composés du pourcentage de fleurs contaminées et du pourcentage d'attaque enregistrés sur une même parcelle et cela au cours de 3 années « sclérotinia » contrastées du point de vue du niveau des attaques : 2007

année de très fortes attaques, 2008 année d'attaques faibles à fortes localement et 2009 année d'attaques plutôt faibles. Ces données cumulées avec celles précédemment acquises constituent une base de quelques 930 données (Figure 2). Sans relation directe entre l'indicateur et le taux d'attaque final, la méthode statistique des courbes ROC a été utilisée pour évaluer les performances de l'indicateur et définir un seuil de décision pertinent. Toutes années confondues de 2000 à 2009, pour ne pas dépasser une fréquence de 10% de faux négatifs, le seuil de décision s'établit à 30% de fleurs infectées. Les règles de décision basées sur cet indicateur sont simples : un traitement est recommandé lorsque le pourcentage de fleurs contaminées est supérieur au seuil de décision de 30% de fleurs infectées. Aucun traitement n'est recommandé lorsque le taux de fleurs contaminées est inférieur à ce seuil.

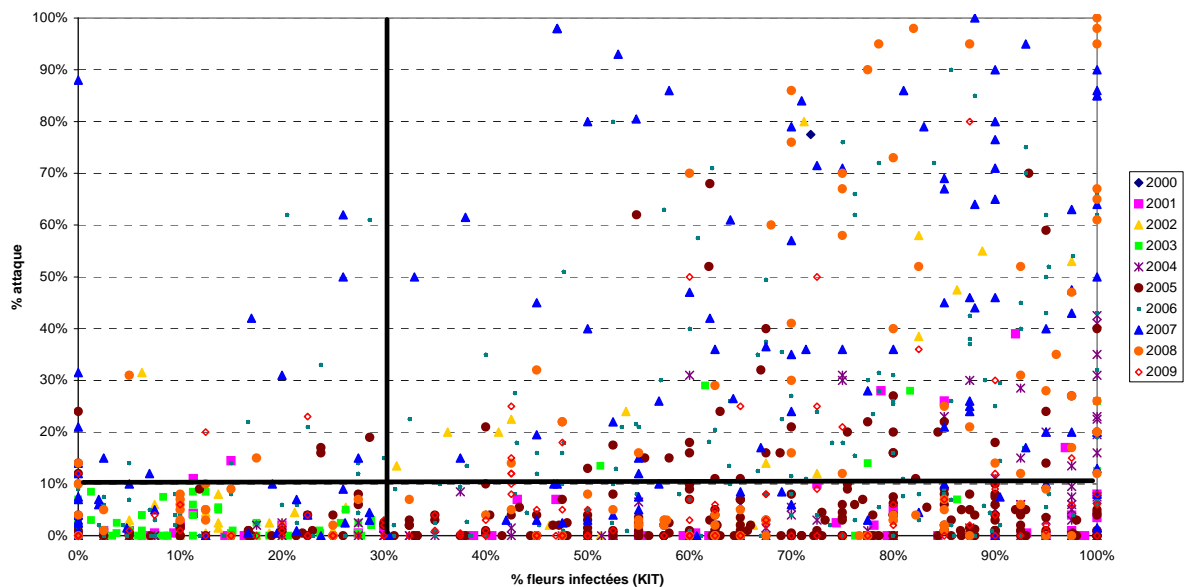


Figure 2 : Relation entre le taux de fleurs infectées et le taux d'attaque final observés sur 934 parcelles entre 2000 et 2009

Mais les difficultés majeures rencontrées sur le terrain relatives à la manipulation de boîtes de Petri et surtout à la lecture des résultats ont fait naître l'idée d'une substitution du kit pétales par une mesure de la charge en spores d'un échantillon de 40 fleurs.

La méthode de quantification mise au point (qPCR) assure un seuil de détection estimé à 1000 équivalent-spores / 40 fleurs, soit 25 équivalent-spores non germées par fleur. Les résultats obtenus ne permettent pas d'établir une relation directe entre la quantification d'ADN d'un échantillon de 40 fleurs et le taux de fleurs contaminées dans un échantillon analogue de 40 fleurs (Figure 3). Cette absence de corrélation s'explique par la nature des mesures qui sont très différentes : d'un côté, on quantifie l'ADN présent sur les fleurs sous forme de spores et/ou de mycelium, de l'autre, on mesure un pourcentage de fleurs contaminées en favorisant le développement mycélien du champignon sur un milieu semi-sélectif. De même, il n'est pas permis d'établir une relation entre la quantification d'ADN et le taux final d'attaque. En conséquence, il n'est pas envisageable à ce jour de substituer la méthode kit pétales utilisée actuellement, par la méthode qPCR de quantification du sclérotinia sur fleur, comme outil d'aide à la décision pour traiter ou non les parcelles. Cela ne pourrait être envisagé qu'avec une réduction des coûts de logistique de gestion et transport des échantillons sans rupture d'un chaîne du froid, et surtout l'établissement de règles de décision propre à cet indicateur

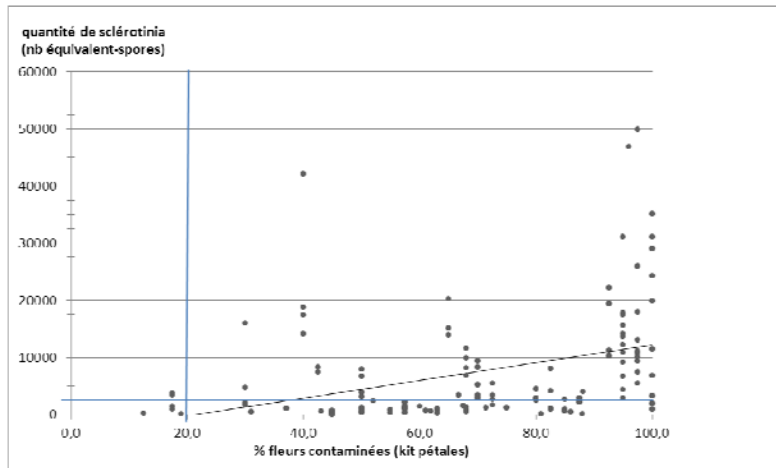


Figure 3 : Relation entre les résultats des kits pétales et les quantités de sclérotinia définies par PCRq pour chaque échantillon

2.2 Conception d’OAD basés sur un modèle épidémiologique

Cette action est focalisée sur la septoriose du blé. En absence de modèle épidémiologique disponible ARVALIS a développé son propre modèle SeptoLIS correspondant à une adaptation d’un modèle couplé plante-pathogène décrit par Audsley *et al* (2005) qui intègre côté plante le rythme d’émergence des feuilles (modèle de phyllotherme) et côté pathogène un module de développement hivernal de l’inoculum basé sur la température et la pluie journalière à partir du stade début tallage. Codé en 2007, le modèle a fait l’objet d’une première calibration sur plus de 400 essais couvrant 12 années d’expérimentation et a abouti à formuler les propositions de règles de décision pour déclencher le 1^{er} traitement

2.2.1 Conception d’un OAD septoriose qui permet de prendre une décision de déclenchement du 1^{er} traitement T1.

Des essais mis en place en 2008 (12 essais) et 2009 (18 essais) ont permis de tester le module décisionnel quant à l’enjeu d’un positionnement réussi à la fois en termes de production mais aussi en termes d’optimisation de l’utilisation des produits fongicides. En 2009, 13 essais antérieurs conduits avec des protocoles équivalents ont également été valorisés, validant la robustesse des règles de décision sur un encore plus grand nombre d’années (fin des années 80, 99 et 2000) et avec des produits différents.

En 2008, le modèle a déclenché des traitements allant du stade « deux nœuds » jusqu’à peu avant le stade « dernière feuille étalée ». En 2009, du fait de l’hiver froid suivi de contaminations intenses en fin montaison, les déclenchements sont beaucoup plus regroupés entre « dernière feuille pointante » et « dernière feuille étalée ». Par contre, dans les essais historiques, les meilleurs déclenchements se positionnaient plus précocement, proche du stade « deux nœuds ».

Le gain moyen entre le moins bon positionnement et différentes stratégies de positionnement à stade fixe ou avec SeptoLIS est présenté (Fig 4) : on remarque que, pour une année donnée, SeptoLIS fait aussi bien que la meilleure des stratégies de positionnement à stade fixe. Mais on remarque aussi que le meilleur stade d’intervention varie selon les années, d’où l’intérêt de déployer un tel modèle. Ainsi SeptoLIS, en intégrant les facteurs de variations climatiques et phénologiques, permet régulièrement de se rapprocher du positionnement idéal du premier traitement. Ce dernier peut varier fortement d’une année à l’autre ou même d’un site à l’autre (Gouache *et al*, 2009b). Or, le positionnement des traitements fongicides contre la septoriose constitue un levier d’action contribuant à répondre au double enjeu environnemental et de gestion des résistances de la protection fongicide.

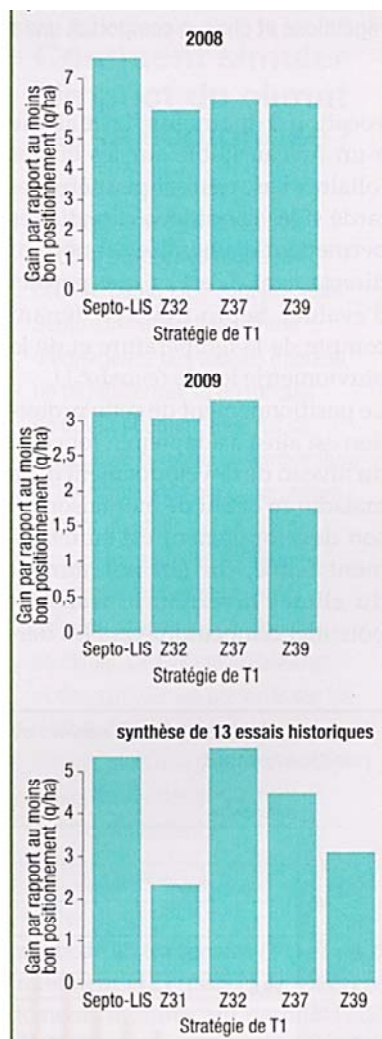


Figure 4 : Ecarts de rendement (q/ha) entre meilleur et moins bon positionnement des traitements en fonction de la stratégie de déclenchement du T1 basée sur le modèle ou différents stades. Le déclenchement via le modèle permet d'approcher le positionnement idéal dans les essais 2008, 2009 et des essais antérieurs dits « historiques ».

3. Modélisation des interactions Hôte x agents pathogènes du blé et apports à la conception d'itinéraires techniques minimisant l'impact d'une maladie

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une structure collaborative entre recherche (UMR INRA-AgroParisTech EGC) et développement (Arvalis) avec la conception d'un modèle dynamique permettant la compréhension des interactions plante-pathogène pour la première et la mise au point d'une méthode de confrontation des simulations du modèle et de données expérimentales pour le second.

3.1 Conception d'un modèle architecturé pour l'étude des relations hôte x maladies

Le modèle est bâti d'après un schéma conceptuel qui procède d'étapes intermédiaires (modules) qui permettent de comprendre, de quantifier, d'associer et/ou de décorréliser les processus, et de les modéliser (Gouache *et al*, 2009d). Ces étapes intermédiaires décrivent (Figure 5) :

- l'effet de la maladie sur la plante ; la maladie, variable d'entrée, est spatialisée dans le couvert et la sortie de ce module en est les dommages et donc une approche de la nuisibilité (Module 1)

- l'effet de l'environnement sur l'agent pathogène (cycle infectieux et dispersion des spores), généré par l'état des feuilles, lieu de rencontre entre le pathogène et son hôte, et par l'architecture du couvert sur l'épidémie (Module 2).
- relations entre structure du couvert et environnement physique du pathogène (Module 3).

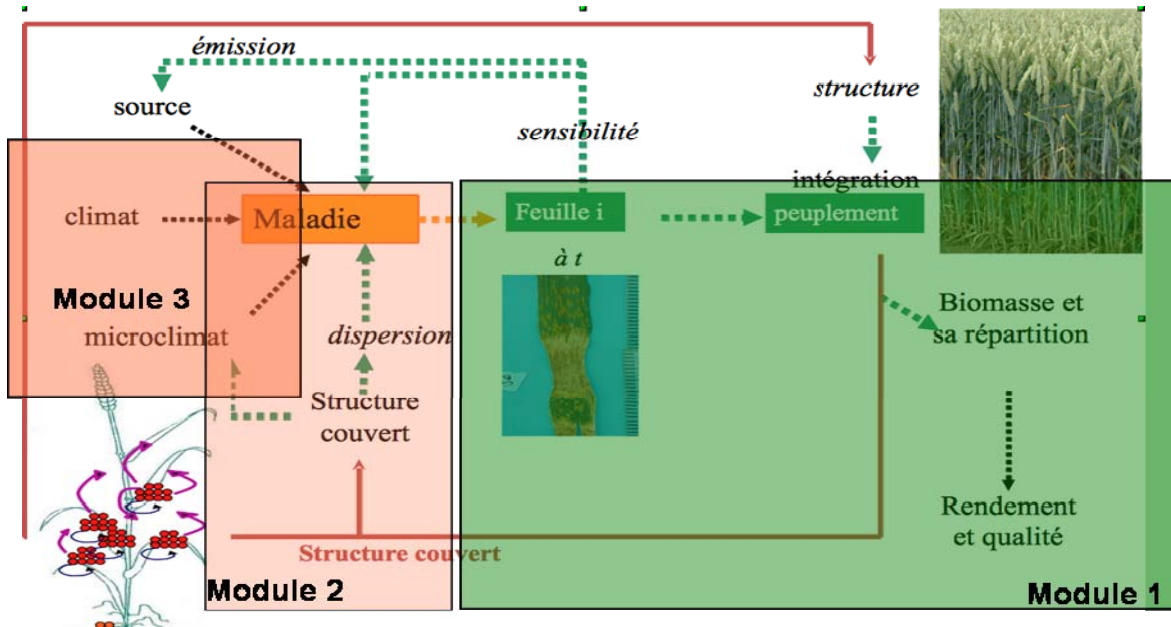


Figure 5: Représentation conceptuelle des relations entre hôte (Blé) et parasite (*Septoria tritici*)

Dans le cas de la septoriose du blé, le modèle Septo3D mis au point par l'INRA correspond à un modèle couplé décrivant le développement des épidémies de septoriose dans des couverts de blé associé à un module décrivant le cycle infectieux de la septoriose (infection, incubation, sporulation, production de nécroses), un module de dispersion des spores, et un module de développement et de croissance du blé en trois dimensions (Robert *et al*, 2008). Il utilise comme entrée des données météorologiques horaires (température, pluie, humidité) et des paramètres de description de la structure 3D du couvert. Il permet notamment de faire varier différents paramètres du développement et de la croissance du blé « toutes choses égales par ailleurs » afin de déterminer l'impact relatif de ces paramètres sur les épidémies de septoriose. Pour hiérarchiser les facteurs, différents paramètres de développement du couvert (longueur de feuilles, largeur de feuilles, hauteur de tige, vitesse d'extension de tige, phyllotherme (somme de températures en degré-jours qui sépare l'apparition de 2 feuilles successives) ont été variés un par un ou en combinaison pour des simulations de développement d'épidémies sur dix années de climat sur le site de Grignon (78).

Parmi tous les paramètres de croissance et de développement du blé testés pour leurs effets sur la septoriose, c'est le phyllotherme qui a la plus grande influence sur les épidémies de septoriose. Lorsque le phyllotherme augmente, la vitesse de développement de la plante est réduite dans son ensemble (baisse de la fréquence d'émission des feuilles, des vitesses d'allongement des organes et de la vitesse de sénescence des feuilles) et les feuilles sont plus fortement touchées par la maladie. Au contraire, lorsque la vitesse d'émergence des feuilles est plus rapide (phyllotherme plus petit), la plante se développe plus vite et réussit à échapper à la maladie (Figure 6)

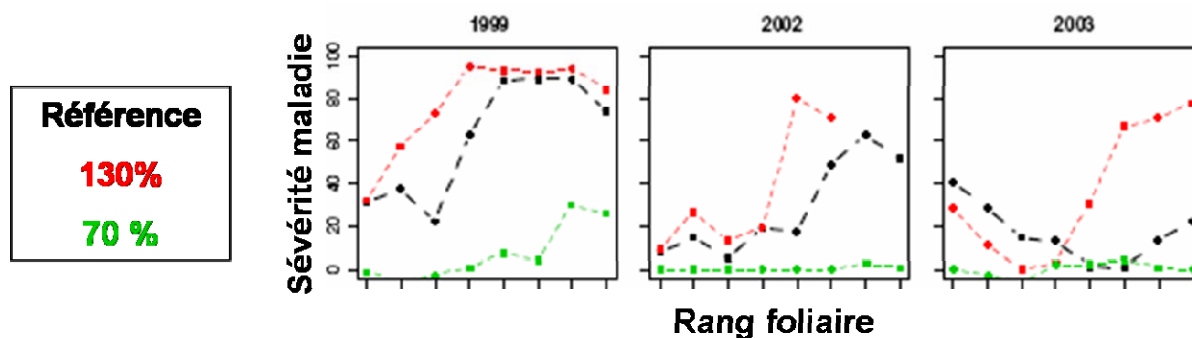


Figure 6 : Impact du phyllotherme sur la sévérité d'épidémies de septoriose sur 3 années. Le phyllotherme a été varié pour des valeurs de 70% et 130% d'une valeur de référence habituellement observées en conditions agricoles (le rang foliaire va du plus bas au plus haut de la gauche vers la droite) (adapté de Robert *et al.* 2008)

3.2 Conception d'itinéraires techniques minimisant le risque septoriose

Des expérimentations (3 en 2007, 3 en 2008 et 2 en 2009) ont été mises en œuvre chez ARVALIS pour tester l'intérêt du modèle vis-à-vis de l'étude de certains éléments de l'itinéraire technique sur la septoriose. La démarche a consisté dans un premier temps à comprendre, quantifier et hiérarchiser les mécanismes liés à l'évitement de la maladie, et modifiables par des techniques culturales (densités et dates de semis, fractionnement et doses d'azote...). En effet, ces techniques qui jouent à la fois sur l'architecture (distance entre organes) et sur l'état physiologique des organes (le "substrat" pour les champignons) sont susceptibles de ralentir la progression de la maladie vers les étages supérieurs, donc de diminuer la nuisibilité.

L'utilisation du modèle a démontré la faisabilité de l'utilisation de tels modèles architecturés dans la conception d'itinéraires techniques, par exemple l'intérêt d'un semis tardif pour éviter l'infection des feuilles par la septoriose (Gouache *et al.*, 2009e). En effet, il est communément admis qu'un semis tardif qui entraîne une vitesse d'émission de feuille supérieure, a pour conséquence de restreindre l'infection mais s'accompagne aussi d'une diminution du potentiel de rendement. L'étude du modèle Septo-3D montre que plus les feuilles du blé émergent rapidement, ce qui est le cas en semis tardif, plus elles échappent à la maladie.

Le modèle SeptoLIS, lui, intègre bien l'interaction date de semis – phyllotherme (Gate 1995)– septoriose (Figure 7). Combiné à des indicateurs d'effets de stress climatiques (stress hydrique et échaudage thermique) sur le rendement, il a été possible à partir d'une étude fréquentielle sur 20 années de données climatiques (1989 - 2008) sur différents sites de déterminer en fonction de la date de semis la probabilité de réduire suffisamment la pression de septoriose pour réaliser une impasse sur le 1^{er} traitement et celle de perdre du potentiel de rendement. Cela a permis d'objectiver et de régionaliser les possibilités d'économie du premier traitement anti-septoriose tout en préservant le potentiel de rendement. (Tableau 1). Ainsi, le modèle a permis de déployer des conseils opérationnels à la fois sur le plan tactique – positionnement du 1^{er} traitement anti-septoriose – et stratégique – intérêt des semis tardifs en terme de réduction de pression phytosanitaire.

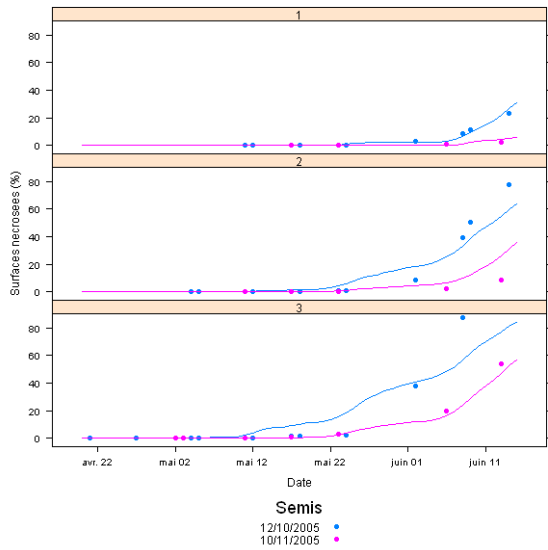


Figure 7 : Exemple de simulations sur les 3 derniers étages foliaires pour des parcelles (Villiers (91)) semées à 2 dates différentes. Les lignes représentent les valeurs simulées et les points les observations

| Secteur | Caractéristiques | Economie de 1 ^{er} traitement septoriose | | | Semis les plus tardifs possibles en terme de potentiel de rendement ^a | Bilan |
|--|--|---|------------------------------|-----------------|--|---|
| | | 2 années sur 10 | 5 années sur 10 | 8 années sur 10 | | |
| Bordure maritime Nord : Nord Bretagne, plaine de Caen, Seine Maritime, Somme | Forte marge de manœuvre en terme de potentiel de rendement et pression de septoriose parfois tardive | Mi novembre | - | - | Fin novembre | Possibilité de limiter les interventions systématiques pour les semis de la 2 ^{ème} moitié de novembre |
| Nord-Ouest hors bordure maritime (Eure, Picardie) | Forte marge de manœuvre en terme de potentiel de rendement et pression de septoriose parfois tardive | Mi-octobre | Fin octobre – début novembre | Mi novembre | Fin novembre | Possibilités d'économie significatives pouvant aller jusqu'à une refonte du programme pour la 2 ^{ème} moitié de novembre |
| Centre, Berry, Bourgogne, Sud Bretagne (Pays de Loire) | Marge de manœuvre et pression de septoriose intermédiaire | Début octobre | Fin octobre | | Mi octobre | Les semis de septembre impliquent une intervention systématique pouvant être évitée avec des semis de début octobre |
| Nord-Est (Champagne, Lorraine) | Marge de manœuvre limitée et pression de septoriose tardive | Fin septembre | Fin octobre | Mi novembre | Mi octobre | Les semis de septembre impliquent une intervention systématique pouvant être évitée avec des semis de début octobre |
| Poitou-Charentes, (Pays de Loire) | Marge de manœuvre limitée et pression de septoriose précoce | Début novembre | - | - | Mi à fin octobre | Pas de réduction de pression possible sans pertes de rendement significatives |

^a : indication moyenne : les marges de manœuvre sont légèrement plus réduites en sols superficiels et plus larges en sols profonds

Tableau 1 : Synthèse des possibilités d'économie de traitements anti-septoriose et de préservation du potentiel de rendement en fonction des dates de semis (cas d'une précocité de type Soissons)

3.3 Mise au point d'une méthode de paramétrage variétal

La conception d'itinéraires minimisant le risque septoriose prend en considération un déploiement de variétés résistantes à la septoriose. Or, identifier des génotypes résistants à la septoriose se heurte à des difficultés méthodologiques, notamment celle de confondre niveau de résistance à la septoriose et précocité variétale, corrélés négativement. Par ailleurs, il est important d'identifier la méthode permettant d'intégrer les différences variétales de manière pertinente dans le modèle. Pour répondre aux deux questions – amélioration des méthodes de caractérisation de la résistance variétale et prise en compte des résistances dans l'OAD SeptoLIS, des expérimentations ont été menées en 2007 et 2008 sur 6 à 9 variétés de sensibilité et de précocité différentes, traitées ou non avec un programme

fongicide avec suivi de la septoriose par étage foliaire. Le premier constat, illustré par l'exemple d'un essai (Figure 8), est que les différences de résistances variétales deviennent visibles avant tout sur les 2 derniers étages foliaires. Or, la prise de décision de premier traitement se fait avant l'expression de ces différences. La prise en compte de la résistance variétale, pour influencer sur la prise de décision prise par l'OAD, doit donc se faire au niveau de la règle de décision d'interprétation du modèle, et non sur la simulation elle-même : ainsi, on tolère plus de contaminations sur les feuilles basses d'une variété résistante par rapport à une variété sensible.

Les essais ont également permis de valider le fait que les corrélations observées dans les essais entre notes de septoriose et précocité sont bien un biais d'observation, qu'il importe de corriger. Ce biais est lié à l'épidémiologie particulière de la maladie, qui est sous forte dépendance des dates d'émergence des feuilles successives. Ainsi, entre une variété précoce et tardive, au moment où l'expérimentateur note sa parcelle, la maladie a eu plus de temps pour se développer sur la variété précoce. Pourtant, ce qui importe, du point de vue de la perte de rendement, c'est la durée physiologique durant laquelle l'interception de lumière est réduite par la présence de maladie. Pour valider ceci, la rapidité avec laquelle la maladie s'exprime sur chaque variété a donc été exprimée par rapport à la date d'émergence de l'étage foliaire observé : pour chaque variété, la durée entre la date d'émergence d'un étage foliaire et la date où sa surface verte a diminué de 10% due à la septoriose est exprimée en degrés-jour (base 0). Cet indicateur t_{90} est bien relié au rendement des variétés non traitées, pour une large gamme de niveaux de résistance et quelle que soit la précocité (Figure 9). Ces résultats valident la pertinence de la prise en compte de la précocité variétale, par exemple la date d'épiaison (très corrélée à la date d'émergence des dernières feuilles), comme covariable pour attribuer des notes de résistance variétale. La méthodologie pour décorréler résistance et précocité continue à être étudiée dans le cadre d'autres projets

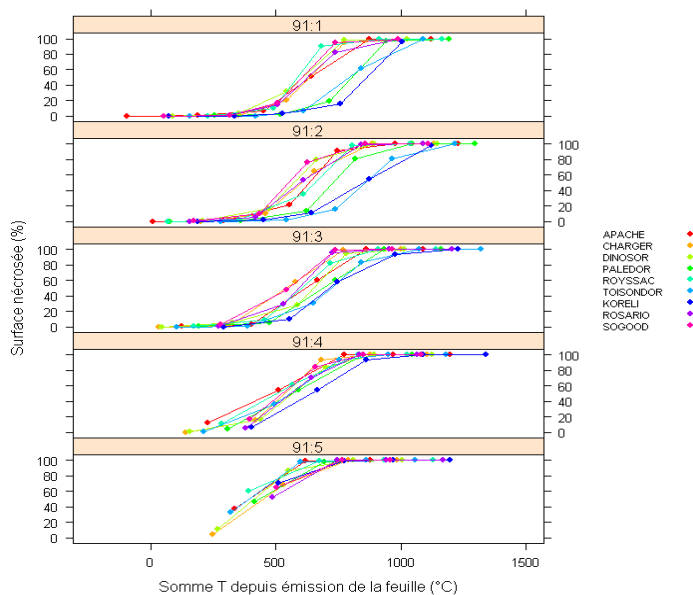


Figure 8 : Evolution de la septoriose sur les 5 derniers étages foliaires d'une gamme de variétés

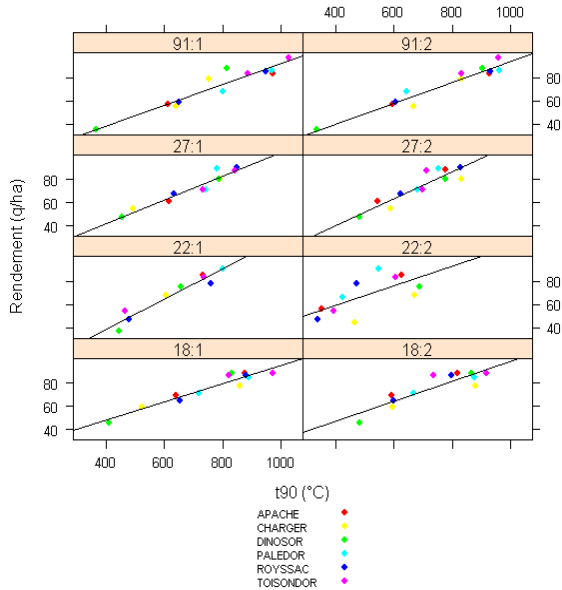


Figure 9 : Relations entre l'indicateur de classement variétal t_{90} et le rendement

3.4 Vers une application du concept de modèle architecturé pour le colza

Les enseignements de l'approche modèle agro-physiologique pour la conception d'itinéraires techniques minimisant les risques pour le couple blé-septoriose ont donné lieu à un transfert de ce concept en colza. L'étude a été conduite dans le cadre d'une réponse à l'appel d'offre du Casdar 2008 et a donné lieu à un nouveau projet intitulé PICOBLE « Protection intégrée des rotations avec colza et blé tendre : conception et évaluation multicritères d'itinéraires techniques économes en produits phytosanitaires ». Pour le colza, le projet traite d'un volet méligèthes et d'un volet sclérotinia, assurant une continuité au présent projet.

Le volet méligèthes du projet a pour objectifs une évaluation de la tolérance du colza aux dégâts causés par les méligèthes en fonction des interactions génotype*gravité de l'attaque et une définition d'idéotypes architecturaux favorisant la tolérance au moyen d'un modèle structure-fonction.

Le volet sclérotinia se focalise sur le rôle du couvert dans l'expression de la maladie, en jouant sur les facteurs influençant les états du couvert tels que densité, hauteur, architecture des plantes, fertilisation azotée et qui, en assurant une meilleure aération du couvert, peuvent permettre d'éviter les symptômes finaux. L'acquisition de ces données conduira à une valorisation dans la conception d'itinéraires techniques intégrés.

En conclusion

Les activités de modélisation ont considérablement progressé pour aboutir au terme du projet à un premier outil, le modèle épidémiologique SeptoLIS. En outre, ce modèle couplé à un modèle 3D de la culture du blé a permis de valider une stratégie d'esquive de la septoriose basée sur un ajustement de la date de semis sans pénaliser le potentiel de rendement. Ces outils sont opérationnels, même si des efforts doivent être poursuivis pour améliorer certaines interfaces et développer plus largement leur usage auprès des producteurs et de leurs conseillers.

Références bibliographiques

- Audsley E., Milne A., Paveley N., 2005. A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems. *Aspects of Applied Biology* 147, 161-172.
- Bancal M.-O., Bancal P., Ben Slimane R., Gate P., Gouache D., 2009. Tolérance du Blé à la septoriose. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 339-346.
- Couleaud G., Maumené C., Walker A.-S., Leroux P., 2009. "Réseau performance" : une 6^{ème} année de diagnostic de la résistance de *Septoria tritici* aux principaux fongicides utilisés en France. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 640-659.
- Gate, P. 1995. Ecophysiologie du blé. ITCF, Tec&Doc/Lavoisier (Eds.)
- Gouache D., Selim S., Roisin C., Sanssené J., 2009a. La PCR quantitative : un potentiel à creuser pour la prévention des symptômes de septoriose. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 58-66.
- Gouache D., Couleaud G., 2009b. Le positionnement des traitements fongicides : enjeu pour la septoriose et intérêt du modèle « SeptoLIS ». AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 455-461.
- Gouache D., Robert C., 2009c. Un nouvel indicateur de classement variétal vis-à-vis de la septoriose prenant en compte la précocité variétale. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 329-338.
- Gouache D., Andrieu B., Bancal M.-O., Bancal P., Chelle M., Fournier C., Gate P., Robert C., Ney B., 2009d. Modélisation des interactions épidémie-couvert végétal : de la recherche à la mise au point d'outils opérationnels pour la protection intégrée des cultures. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 390-399.
- Gouache D., Gate P., Robert C., Fournier C., 2009e. Date de semis, pression de septoriose et potentiel de rendement : de la compréhension à la préconisation opérationnelle. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 263-271.
- Moinard J., Leroux P., Penaud A., Remuson F., Walker A.-S., Micoud A., Huguet B., 2009. Résistance de *Sclerotinia sclerotiorum* aux fongicides utilisés sur colza : bilan de la surveillance du territoire de 2000 à 2008. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 771-780.
- Penaud A., Wagner D., Makowski D., Ruck L., 2009. Evaluation d'un indicateur de risqué en tant qu'outil d'aide à la décision d'une protection contre la sclérotiniose du colza. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 400-407.
- Robert C., Andrieu B., Fournier C., Gouache D., Gate P., Ney B., 2009. SEPTO3D : un modèle pour analyser les effets de la structure des couverts de blé sur les épidémies de septoriose. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 472-482.
- Robert C., Fournier C., Andrieu B., Ney B. 2008 - Coupling a 3D virtual wheat (*Triticum aestivum*) plant model with a *Septoria tritici* epidemic model (Septo3D): a new approach to investigate plant-pathogen interactions linked to canopy architecture. *Functional Plant Biology* 35, 10, 997-1013.
- Thepot S., Gouache D., 2009. Etude d'un modèle climatique de prévision de la nuisibilité de la rouille brune sur blé dur en France. AFPP, 9^{ème} Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8-9 décembre 2009. pp 505-514.