



## **ECHAP « L'architecture des couverts végétaux : un levier pour réduire l'utilisation des fongicides ? »**

### **ECHAP project “canopy architecture: a lever to reduce fungicide use?”**

Programme Evaluation et réduction des  
risques liés à l'utilisation des Pesticides  
APR 2009  
Rapport final – 15 mai 2015

Corinne Robert

INRA UMR 1402 INRA AgroParisTech Ecologie fonctionnelle  
et écotoxicologie des agroécosystèmes ECOSYS

Date : 15/05/2015

N° de contrat : 1879/10

Date du contrat : 27/12/10

**Action pilotée par le Ministère chargé du développement durable,  
avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux  
aquatiques, par les crédits issus de la redevance pour pollutions  
diffuses attribués au financement du Plan Ecophyto**

## **SYNTHESE**

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

### **ECHAP « L'architecture des couverts végétaux : un levier pour réduire l'utilisation des fongicides ? »**

**Corinne Robert**

UMR 1402 INRA AgroParisTech Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes ECOSYS

Mail : Corinne.Robert@grignon.inra.fr

#### **Laboratoires et autres organismes partenaires :**

**INRA** UMR 1402 INRA AgroParisTech Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes ECOSYS

**INRA** UMR 1290 INRA-AgroParisTech BIOlogie et GEstion des Risques en agriculture – Champignons pathogènes des Plantes (BIOGER-CPP)

**INRA** UMR 1095 INRA-Université Clermont II, «Génétique, Diversité et Ecophysologie des Céréales» (GDEC)

**CNRS** UMR 6505 CNRS-Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II),

**INRIA CIRAD** UMR CIRAD-INRA-IRD-Montpellier SupAgro-Université Montpellier 2 Développement et Amélioration des plantes (DAP) - Equipe Virtual Plant (INRIA)

**ARVALIS – Institut du végétal.** Station de Boignevilles.

**IRSTEA.** UMR IRSTEA-Montpellier SupAgro Information et Technologie pour les Agro-Procédés (ITAP)

**ADAS (UK)** High Mowthorpe, Duggleby, Malton, North Yorkshire

**ALTERRA - Research Institute for the Green World (Pays Bas)**  
Centre for Water and Climate (WAGENINGEN)

---

## CONTEXTE GENERAL

Le cahier des charges de l'agriculture européenne a profondément évolué : il s'agit de promouvoir une agriculture durable qui concilie production et rentabilité avec qualité des produits et préservation de l'environnement. L'axe 3 du plan Ecophyto 2018 propose d'innover dans la conception et la mise au point de systèmes de culture économes en pesticides. Il incite à développer des approches agro-écologiques limitant la pression parasitaire, et à réorienter la sélection variétale vers des variétés plus résistantes. Cela nécessite de mobiliser la recherche sur l'écophysiologie de la plante et de ses agresseurs et l'épidémiologie des maladies.

La diminution des quantités de pesticides appliquées sur blé depuis 10 ans est largement due à l'introduction de matières actives plus efficaces. En raison de l'importance des surfaces concernées (de l'ordre de 4.8 Mha en blé), les fongicides appliqués sur blé représentent près de la moitié des fongicides appliqués sur grande culture. Ainsi, diminuer, même modérément, les traitements sur blé aura une répercussion significative.

L'architecture des couverts influence les épidémies mais également l'interception des fongicides. Cependant les interactions « architecture du couvert – épidémie – fongicides » sont peu étudiées. Une marge de réduction de pesticides est également possible via les modalités d'application. Des agriculteurs disent maîtriser les maladies du feuillage avec des doses plus faibles grâce à des techniques d'application à bas volume. Mais aucune publication ne le confirme. Actuellement, les préconisations de traitements fongicides prennent principalement en compte le risque climatique. Ces préconisations aboutissent en général à des traitements assez systématiques pour les cultures intensives classiques. L'élaboration de stratégies raisonnant architecture du couvert, date, dose et modalité d'application doit permettre de diminuer les besoins en fongicides.

C'est dans cette optique que nous avons développé le projet ECHAP qui porte sur les effets de l'architecture du couvert sur les épidémies et l'interception des fongicides. L'hypothèse du projet est que l'architecture des couverts est un levier pour réduire les besoins en fongicides. La diversification des systèmes agricoles afin qu'ils soient plus adaptés localement et plus durables va s'accompagner de préconisations en pesticide plus précises et plus localisées. Cette évolution tendancielle des pratiques présente un potentiel pour tenir mieux compte des variables du couvert. Actuellement l'évaluation des stratégies de traitement est principalement réalisée en considérant l'effet sur les rendements. Développer des outils d'évaluation permettant d'évaluer sur le moyen terme les stratégies fongicides en termes d'impact environnemental est un point clé pour proposer des stratégies durables.

## OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

L'objectif général du projet est d'identifier les possibilités de réduction de traitements fongicides *via* l'utilisation de couverts échappants aux maladies et *via* l'optimisation de l'interception des fongicides. Il s'agit de quantifier l'économie de fongicides *via* le levier des architectures des couverts.

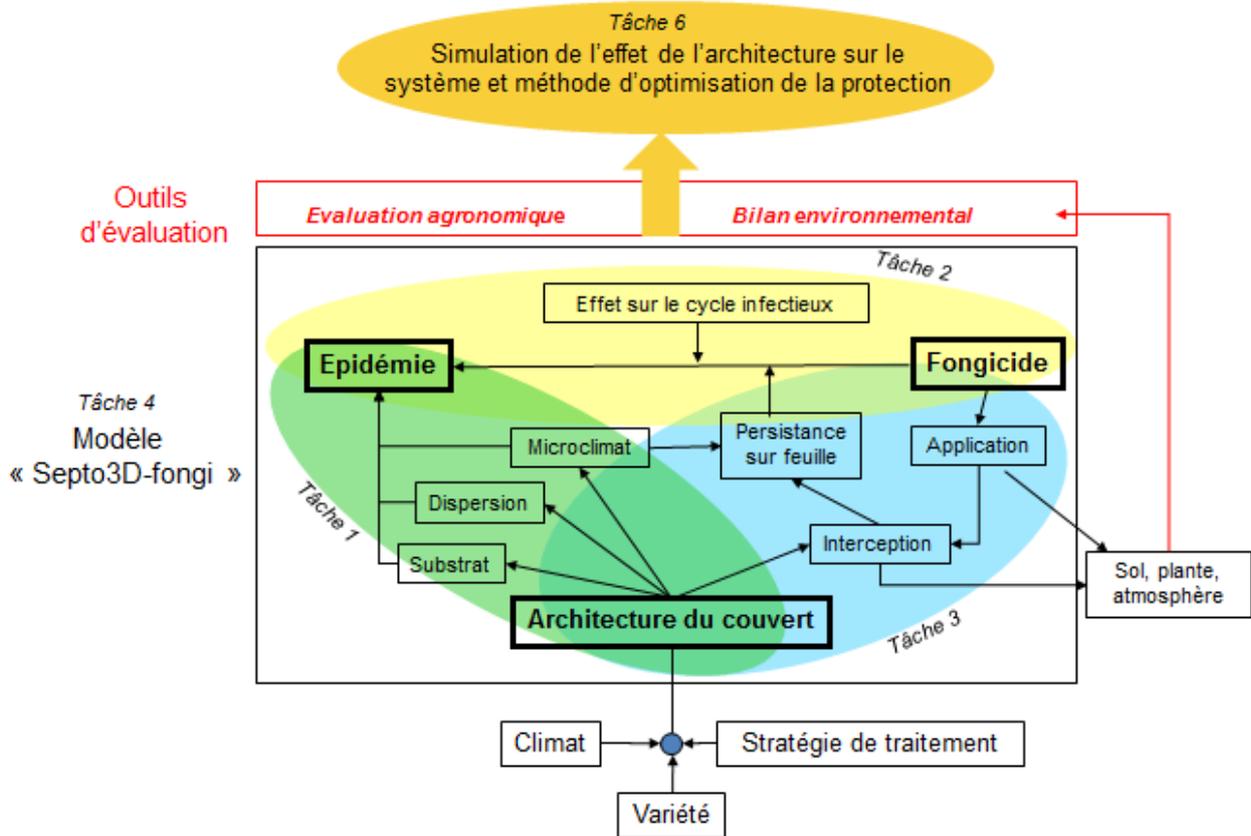
Cet objectif se décline en cinq objectifs complémentaires et connectés : (1) Etudier les interactions entre l'architecture des couverts, les épidémies, l'interception des fongicides et leur effet sur les pathogènes, (2) Tester l'opérationnalité des idées du projet via une expérimentation au champ sur 3 saisons, (3) Développer un outil de modélisation pour la simulation de traitements fongicide pour des architectures variées qui simule le développement d'un couvert de blé, les épidémies associées et les effets de traitements fongicides et y associer une évaluation multicritère des stratégies, (4) Valider le modèle développé à l'échelle de la parcelle avec les données de terrain et (5) Utiliser le modèle pour tester des stratégies de traitements pour des architectures variées.

## ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

**Le projet s'appuie sur des travaux de modélisation et d'expérimentations (figure 1).** Les expérimentations menées ont été de deux types : (1) en conditions contrôlées, elles ont levé des verrous de connaissances sur le système, ce qui a permis de comprendre et modéliser les mécanismes liant l'architecture des plantes, le développement du champignon et le devenir du fongicide sur les feuilles ; (2) au champ, elles ont permis de tester l'opérationnalité de l'approche sur le terrain. Les expérimentations au champ ont eu lieu à Boigneville à la station ARVALIS institut de végétal sur les 3

années du projet. Les expérimentations pour comprendre les mécanismes ont eu principalement lieu à l'INRA de Grignon à l'unité ECOSYS.

Pour les aspects de modélisation, le modèle Septo3DFongi simulant le développement des plantes et leur architecture, l'interception du fongicide et les épidémies à l'échelle du couvert a été mis au point. Il a utilisé les résultats expérimentaux du projet pour simuler les mécanismes clé. Des critères d'évaluation sur différents aspects (agronomique, épidémique, environnemental) ont été proposés. De plus, les expérimentations réalisées au champ sont utilisées pour tester les capacités de simulations du modèle. Enfin, des outils d'évaluation multicritère des stratégies ont été associés.



**Figure 1 :** Organisation du projet ECHAP (2010-2014). Les trois fonds de couleurs schématisent les interactions traitées dans le projet : effet de l'architecture sur les épidémies (fond vert, tâche 1), effet du fongicide sur le cycle infectieux (fond jaune, tâche 2) et effet de l'architecture sur l'interception et la persistance du fongicide sur les feuilles (fond bleu, tâche 3). Le cadre noir correspond aux contours du modèle Septo3Dfongi développé dans la tâche 4, et le cadre rouge les outils associés pour l'évaluation des stratégies. Septo3Dfongi est testé par comparaison avec données (tâche 5) et utilisé pour simuler l'effet de l'architecture sur le système et optimiser la protection (tâche 6, fond orange).

**Le pathosystème blé-septoriose** a été retenu, à titre démonstratif car la septoriose est en France, et en Europe de l'Ouest, la maladie majeure du complexe foliaire des maladies du blé. Son contrôle est essentiellement basé sur la lutte chimique.

**Matériel végétal et variation d'architecture.** Des lignées de blé quasi-isogéniques variant pour les allèles *Rht* de réduction de hauteur (semi-naines) ont été utilisées dans le projet. Des semis de lignées quasi-isogénique variant pour les allèles *Tin* de nombre de talles ont été réalisés en année 2 du projet, mais du fait d'un développement précoce de ces lignées et d'un fort gel, les blés sont morts. C'est pourquoi, nous avons utilisé la variété Tremie pour les essais des saisons 2 et 3 à Boigneville (essais disponibles en cours de saison sur le site, sans traitement spécifique).

**Le contexte environnemental et agronomique** correspond à celui du grand bassin parisien, qui peut être considéré comme représentatif des systèmes de production céréalières du Nord de l'Europe. Les

expérimentations de terrain ont été réalisées sur la station expérimentale de Boigneville (ARVALIS). Le sol correspond à des limons profonds.

**Choix des fongicides et stratégies de traitements.** Dans une optique de généralisation des résultats et de test des hypothèses du projet, les fongicides retenus devaient être largement utilisés, et représenter des modes d'action différents, pour que leur efficacité soit dépendante de l'architecture des couverts et de la dynamique des épidémies. Les fongicides retenus sont l'époxiconazole (triazole, préventif systémique) et le chlorothalonil (chloronitrile, curatif et de contact).

Il y a classiquement 2 traitements fongicides contre la septoriose. Le premier traitement a lieu à feuille 2 pointante (feuille 1 = feuille drapeau) ; il a pour objectif de protéger les feuilles 3 et 4 afin de diminuer la pression de maladie sur les feuilles 1 et 2. Le second traitement lieu à feuille drapeau étalée afin de la protéger. Pour diminuer la quantité de fongicides de moitié, deux pistes ont été testées dans les expérimentations de Boigneville : supprimer un des deux traitements ou diminuer la dose des deux traitements par deux.

## RESULTATS OBTENUS

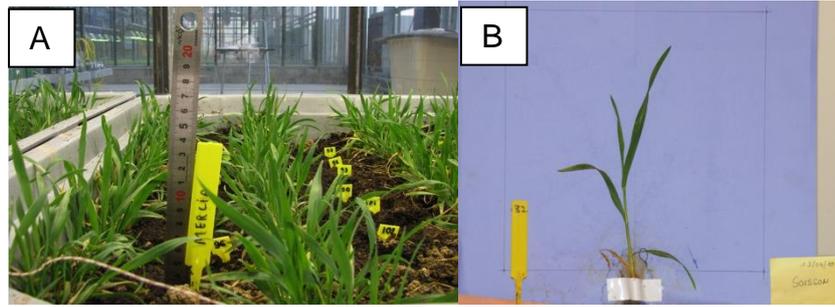
Les résultats obtenus sont structurés selon les objectifs présentés en page 4 de la synthèse :

- (1) Etude des interactions entre architecture des plantes, septoriose et fongicide
- (2) Test de stratégies de traitements fongicides aux champs avec des architectures variées
- (3) Développement du modèle Septo3Dfongi qui simule « couvert – épidémie – interception et effet du fongicide » et des outils d'évaluation des stratégies
- (4) Test du modèle Septo3Dfongi avec les données de l'essai à Boigneville.
- (5) Exploration de l'effet de l'architecture sur l'interception et méthode d'optimisation de la protection
- (6) Exemples de Simulation de l'impact environnemental

### 1 Etude des interactions « architecture x pathogènes x fongicide »

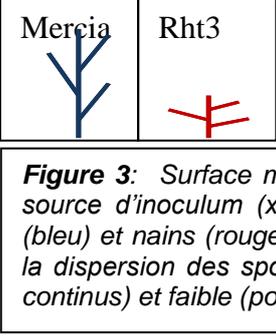
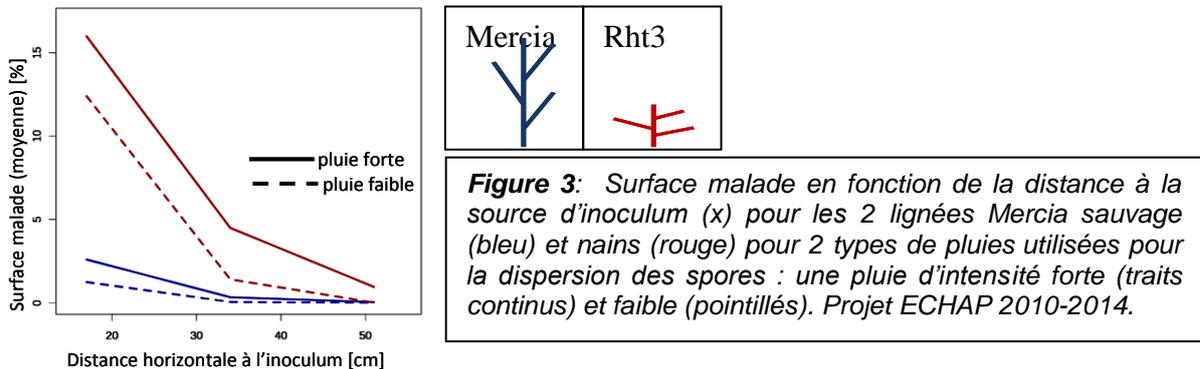
Lorsque nous avons écrit le projet, nous avons identifié des verrous de connaissance pour l'analyse de notre question et le développement du modèle. Des expérimentations ciblées ont donc été réalisées en début du projet afin d'acquérir ces connaissances. Tout d'abord, il était nécessaire de caractériser l'architecture des blés utilisés dans le projet et en particulier de caractériser les dynamiques de courbure des feuilles. Ce trait d'architecture était peu connu chez le blé et nous avons l'hypothèse qu'il est déterminant pour l'interception des produits sur les feuilles. Il était également nécessaire de quantifier finement la dispersion des spores dans des architectures variées de blé, mécanisme clé de l'échappement des architectures végétales. Une connaissance qui manquait également était le devenir des fongicides sur les feuilles : comment les fongicides évoluent à la surface des feuilles, comment et quand pénètrent-ils ? Cette connaissance est nécessaire pour pouvoir simuler le devenir des produits dans l'environnement et donc associer une évaluation environnementale des stratégies fongicides. Dans cette synthèse, nous présentons rapidement les résultats obtenus sur ces 3 points.

**1.1 Dynamique de courbure des feuilles.** Une expérimentation en serre a permis de caractériser l'architecture des variétés du projet. Des mesures du rythme de développement, des dimensions des organes et du tallage ont été réalisées. Les résultats montrent que les allèles de nanisme ne modifient pas seulement les hauteurs des tiges, mais également les largeurs des feuilles qui sont plus fortes chez les blés nains. Partant de l'hypothèse que la courbure des feuilles est un paramètre important pour déterminer la distance à parcourir pour les spores entre feuilles infectées et feuilles saines (Lovell et al. 2004) et pour l'interception des fongicides, nous avons caractérisé la courbure des feuilles sur les différents rangs foliaires et pour les variétés. Les mesures montrent que les courbures des feuilles sont fortement liées à leur âge : elles émergent verticalement puis s'affaissent alors qu'elles vieillissent (Figure 2).



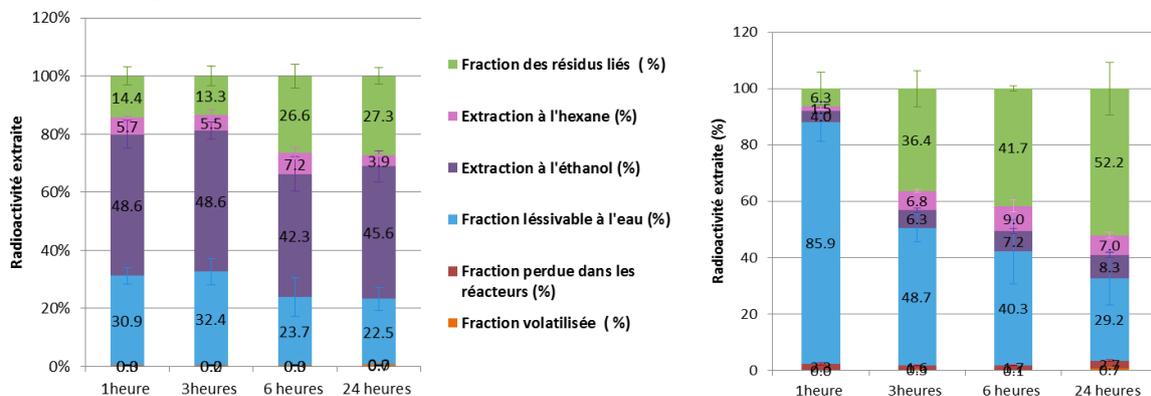
**Figure 2 :** A : Les différentes lignées sont semées en bacs de 1m<sup>2</sup> en serre. B : Les maitre-brins sont photographiés régulièrement pour caractériser la courbure des feuilles. Projet ECHAP 2010-2014.

**1.2 Dispersion de spores dans des architectures contrastées.** Une expérimentation en serre a permis d'acquérir des données fines de dispersion de spores dans des architectures contrastées.



Les notations de surface malade montrent un effet marqué de l'architecture sur la dispersion des spores dans le couvert (Figure 3). Les blés nains présentent des niveaux de maladie nettement plus élevés sur les trois étages foliaires du haut du couvert. La pluie de forte intensité n'entraîne plus de maladie que sur les blés nains.

**1.3 Devenir du fongicide après application sur la feuille.** Pour caractériser la persistance des fongicides sur la feuille après application et leur pénétration, des expérimentations ont été réalisées avec des fongicides radiomarqués au <sup>14</sup>C, appliqués soit purs soit en formulation. Les mesures permettent de caractériser la localisation du produit dans les différents tissus de la feuille après différents délais post-application. Les résultats (Figure 4) montrent que pour l'époxyconazole, la pénétration dans les feuilles est favorisée quand il est appliqué formulé par rapport au produit pur. Les pertes par volatilisation sont par ailleurs faibles. Pour le chorothalonil formulé, on note que la volatilisation évolue d'une manière continue au cours du temps et elle atteint 12% après 24h en lien avec un processus de pénétration foliaire moins important que pour l'époxyconazole. Les résultats montrent que (i) les processus de volatilisation et de pénétration dépendent des propriétés physicochimiques des matières actives et (ii) la formulation favorise fortement la pénétration foliaire des produits systémiques.



**Figure 4:** Bilans de masse de dissipation de l'époxyconazole appliqué à la surface des feuilles. A gauche, produit pur, à droite formulé. Vert : fraction ayant pénétrée les cellules foliaires ; rose : fraction ayant pénétrée la cire cuticulaire ; violet : fraction adsorbée à la surface des feuilles. Projet ECHAP 2010-2014

## 2 Test de stratégies de traitement fongicide pour des architectures variées

**2.1 Protocole.** Trois années d'expérimentations ont été réalisées à Boigneville (station expérimentale Arvalis - Institut du végétal). Un ensemble varié de mesures a été réalisé sur l'essai, dont les principales sont des mesures (1) d'architecture des plantes, (2) de sévérité de septoriose (3) de la quantité d'interception de colorant par les feuilles et (4) météorologiques. Huit modalités de traitement fongicides ont été réalisées. Les parcelles de grande taille (24 m<sup>2</sup>) permettant de réaliser des traitements à différents volumes (nécessitant d'atteindre des grandes vitesses de déplacement) avec un quad équipé d'une rampe de 3 mètres avec 6 buses.

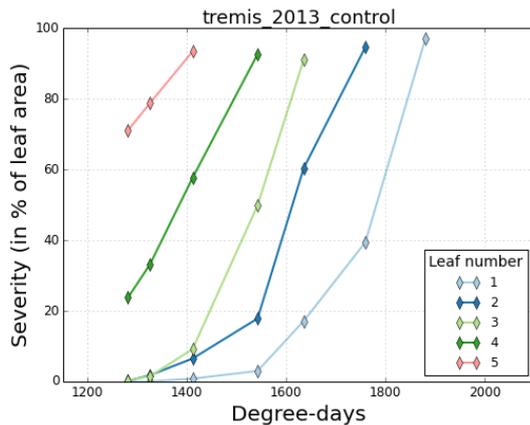
En saison 1 (2010-2011), 2 lignées de blé ont été implantées : il s'agit de Mercia (variété anglaise) et d'une lignée isogénique de Mercia, contenant l'allèle de nanisme pour le gène Rht3 (origine : John Innes Centre Uk). En saison 2 (2011-2012) le même dispositif a été mis en place avec deux lignées différant par la dynamique de tallage (origine GDIEC INRA de Clermont Ferrand). Mais, le gel tardif et fort de cette année a détruit l'essai en hiver. On s'est alors reporté sur des parcelles avec la variété Trémie qui a été également utilisée en saison 3 (2012-2013).

**2.2 Architecture des blés.** Les plantes de blé des trois années d'expérimentation présentent des architectures contrastées. Des différences sont observées pour le nombre d'axes par m<sup>2</sup>, les dimensions des organes et le port des plantes. Par exemple, les surfaces de feuilles les plus grandes et les plus petites sont observées sur la variété Trémie, en saison 3 et 2 et celles des blés Mercia et Rht3 se situent à un niveau intermédiaire entre les 2. Les différences de hauteurs de plantes sont très contrastées, variant de 45 à 80 cm. Le port des plantes semble relativement proche pour les blés des variétés Trémie et Mercia. Mais on note un port différent des blés Rht3 au moment du maximum de tallage (Figure 5). Les blés Rht3 présentent des tiges plus inclinées que ceux de Mercia et Trémie. L'ensemble des mesures réalisées sur les blés ont ensuite été utilisées pour simuler les maquettes 3D des blés et tester le modèle développé dans le projet.



**Figure 5:** Photos d'une botte de plantes au stade plein tallage pour les blés Mercia (gauche) et Rht3 (droite) (saison 1 du projet ECHAP, Boigneville, 2010-2014).

**2.3 Développement des épidémies.** Les épidémies développées ont été différentes pour les 3 saisons d'expérimentation du projet. En saison 1, la maladie s'est assez peu développée mais la sévérité est tout de même plus forte sur la lignée naine. Ainsi malgré un climat plutôt défavorable, la lignée naine présente significativement plus de maladie. Les épidémies se sont bien développées lors des saisons 2 et 3 de l'essai. Cependant du fait d'un climat plus favorable avec des pluies plus régulières, la montée de la maladie sur les feuilles successives est plus régulière en saison 3 qu'en saison 2 (figure 6).



**Figure 6 :** % de septoriose sur les feuilles en fonction des degré-jours depuis le semis pour les blés Tremie en saison 3 des essais à Boigneville  
Projet ECHAP 2010-2014

**2.4 Interception foliaire.** Le colorant tartrazine a été utilisé pour caractériser le dépôt du colorant sur les feuilles après une application de produit à différents volumes et pour les différentes lignées de l'essai. L'objectif est de mimer une application fongicide en mélangeant la tartrazine à de l'eau. On obtient une « bouillie de colorant » qui est pulvérisée à 200 l/ha, 150 l/ha, 80 l/ha et 40 l/ha. Deux pulvérisations ont été faites au stade 1 nœud et au stade dernière feuille étalée.

Les sommes des dépôts sur les quatre dernières feuilles des maîtres brins sont très variables selon la variété, l'année et le stade d'application. Mais le volume de bouillie n'a que très peu d'effet sur les quantités interceptées. La quantité interceptée par les 4 feuilles varie de plus de 100% entre les 4 lignées. La comparaison des saisons 2 et 3 montre par exemple que les feuilles de la variété Tremie ont reçu au total environ deux fois plus de colorant en saison 2 qu'en saison 3. Le dépôt de Tartrazine varie fortement également entre les feuilles et le profil de distribution est variable selon les lignées et les années. L'analyse de variance indique que les dépôts pour les différentes feuilles sont significativement affectés par la variété, l'année d'application et le stade de développement des plantes, mais pas par le volume de bouillie. Les interactions variété x stade de développement, variété x numéro de feuille et numéro de feuille x stade de développement ressortent également significatives. Les effets du stade de développement et du rang foliaire sont donc différents selon la variété et l'année.

En conclusion les mesures de dépôt de colorant sur les feuilles montrent que (1) il n'y a pas d'effet du volume sur le dépôt sur les feuilles du haut du couvert, (2) les quantités déposées sur les feuilles varient selon les architectures, les dates de traitement et les années avec des interactions entre ces facteurs et (3) considérer les différences de surface foliaire entre les architectures n'est pas suffisant pour expliquer les différences d'interception par les feuilles.

En conclusion l'expérimentation réalisée à Boigneville a permis d'acquérir un jeu de données original qui est également utilisé pour tester le modèle du projet.

### 3. Développement d'une boîte à outils logicielle pour la simulation et l'évaluation de stratégies de traitement dans des architectures variées

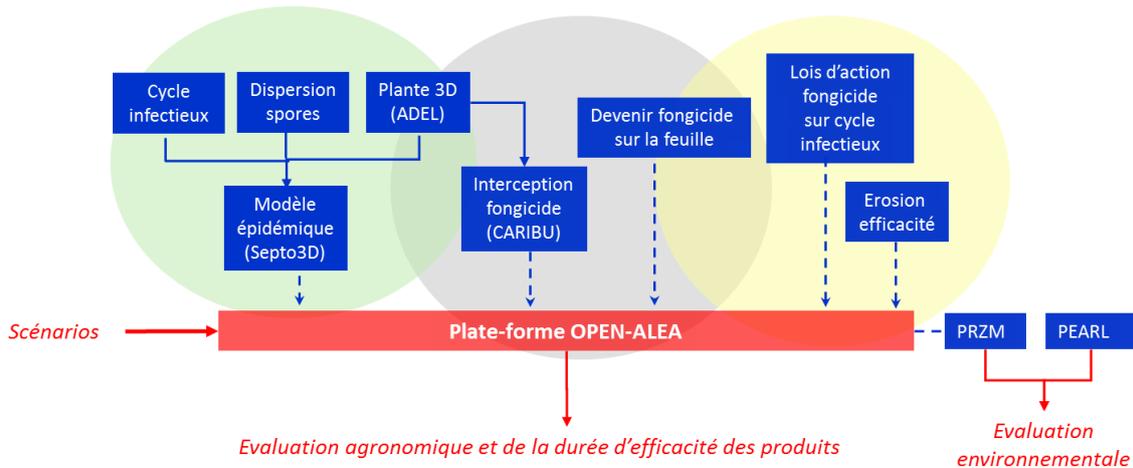
Nous avons réuni sous une plateforme unique (OpenAlea, Figure 7), les composants nécessaires à la simulation des stratégies de fongicides pour différentes architectures de blé. Le modèle Septo3DFongi qui en résulte simule à l'échelle de la parcelle, en 3D et au cours du temps, le développement des plantes, celui de la septoriose, le devenir des fongicides sur les feuilles et leur effet sur la septoriose.

Pour le construire, différents modèles, comprenant notamment Adel-Wheat (Fournier et al., 2003), Septo3D (Robert et al, 2008), Caribu (Chelle et al. 1997), Alep (Garin et al., 2014), Pearl (van den Berg, 2008), Milne et al. (2007) et Saint-Jean et al. (2006) ont été adaptés, étendus et couplés. Les expérimentations réalisées en conditions contrôlées ont permis de paramétrer les composants.

Du point de vue informatique, 'Septo3DFongi' est conçu comme une application à composants indépendants inter-opérables, *i.e.* chaque modèle assurant une des fonctions peut être utilisé de façon indépendante ou couplé aux autres composants. L'assemblage des composants est un succès et le modèle est fonctionnel. Septo3DFongi permet de simuler, pour une dynamique d'architecture de blé et un climat, le développement des épidémies sur les différents étages foliaires ainsi que l'interception de fongicides et son effet sur les épidémies.

Notre objectif a ensuite été d'associer aux simulations du système un calcul de critères d'évaluation des stratégies sur plusieurs aspects permettant de classer les stratégies de façon plus synthétique.

Quatre types de critères ont été proposés : critère épidémique, agronomique (rendement), critère d'érosion de l'efficacité du produit et critère environnemental.

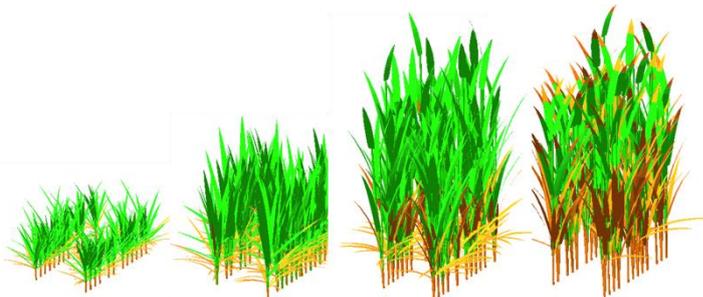


**Figure 7 :** Schématisation de l'assemblage des différents modules pour aboutir à la simulation du pathosystème : blé, septoriose, fongicide. Chaque rectangle bleu indique un composant intégré sur la plateforme OpenAlea (le nom du modèle associé est indiqué entre parenthèses). Les cercles verts, gris et jaune correspondent aux trois agents du système : la plante et son épidémie (vert), l'interception du fongicide et son devenir (gris), son effet sur le champignon (jaune). L'évaluation environnementale des stratégies est simulée par deux modèles, PRZM (Pesticide Root-Zone Model) et PEARL (Pesticide Emission Model at the Regional and Local scale). Projet ECHAP 2010-2014.

#### 4 Test du modèle pour sa capacité à prédire les données de Boigneville

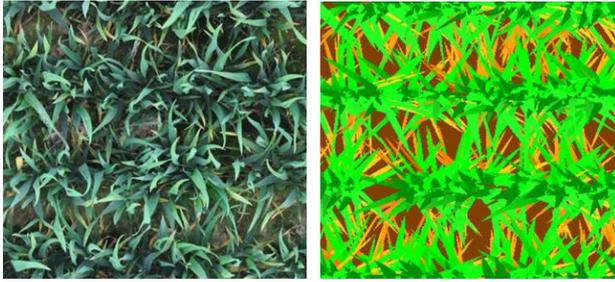
Suite à sa construction, le modèle a été ensuite testé pour ses prédictions avec les expérimentations réalisées à Boigneville sur 3 saisons.

**4.1 Simulation architecture.** Le modèle d'architecture permet de simuler le développement des blés des 3 saisons du projet (Figure 8). Le test de la capacité du modèle d'architecture à reproduire le développement du couvert est fait en comparant simulation et observation sur quatre variables mesurées à l'échelle du couvert : taux de couverture 'vert' en visée verticale (TC, figure 9), taux de couverture 'vert' en visée oblique (TC57), fraction de rayonnement intercepté (Radiation Interception efficiency, RIE) et indice foliaire vert (Leaf Area Index, LAI).



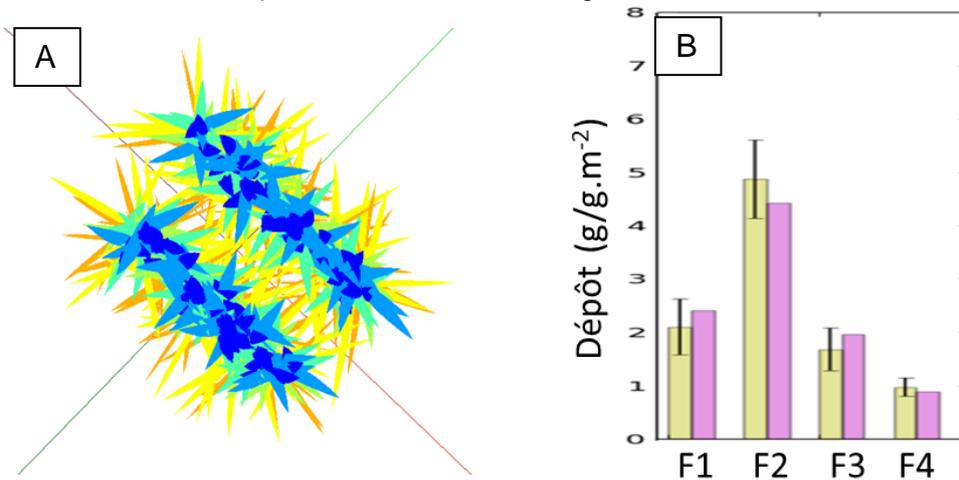
**Figure 8 :** Simulation 3D des blés de la variété Trémie, saison 3. Les images représentent un couvert de 30 plantes aux stades HS 4, 7, 10 et 13 (échelle Haun Stage). Projet ECHAP 2010-2014.

Du semis à la montaison, les données de la variété Trémie en saisons 2 et 3 sont en accord avec les simulations. Au moment des 2 applications de pesticides, au stade 1 nœud (HS 9/10) et au stade dernière feuille ligulée (HS 11/13), le modèle simule correctement les différences absolues et relatives du TC vert, à l'exception des blés Rht3. Le modèle simule bien le classement relatif entre variétés en terme de RIE, mais avec une surestimation systématique en valeur absolue. Au-delà de la seconde application de pesticide après la ligulation de la feuille drapeau, le modèle simule correctement les tendances et les différences entre variétés.



**Figure 9** Photos du couvert Trémie, saison 3, stade HS 9, en visée verticale (gauche) et images verticales des simulations au même stade (droite). La proportion de pixel de végétation rapportée au nombre de pixel total donne le taux de couverture en visée verticale (TC). Projet ECHAP 2010-2014

**4.2 Simulation d'interception de colorant.** La comparaison des données d'interception de tartrazine par les feuilles et des simulations du modèle du projet montrent que la cohérence des simulations varie selon la date de traitement et les lignées testées. Pour la deuxième date de pulvérisation, les simulations d'interception sont supérieures aux interceptions mesurées pour la saison 1 de l'essai du projet, mais les simulations sont cohérentes avec les données pour les saisons 2 et 3 (Figure 10). Notre hypothèse pour expliquer le décalage entre simulations et données pour la saison 1 est la difficulté de rendre compte de l'effet de la mouche grise sur les couverts dans nos maquettes 3D.



**Figure 10** : Simulation de l'interception de tartrazine pour la variété Tremie saison 3, 2ième date de pulvérisation. A : Vue du couvert en visée verticale orthographique, permettant de visualiser les surfaces des feuilles exposées au fongicide. Les différentes couleurs indiquent les rangs de feuilles (feuille drapeau en bleu foncé). B : Données (barres jaunes) et simulation (barres roses) du dépôt de tartrazine sur les 4 feuilles supérieures des maître-brins (F1 = feuille drapeau). Projet ECHAP 2010-14

## 5 Optimisation des traitements pour des architectures variées

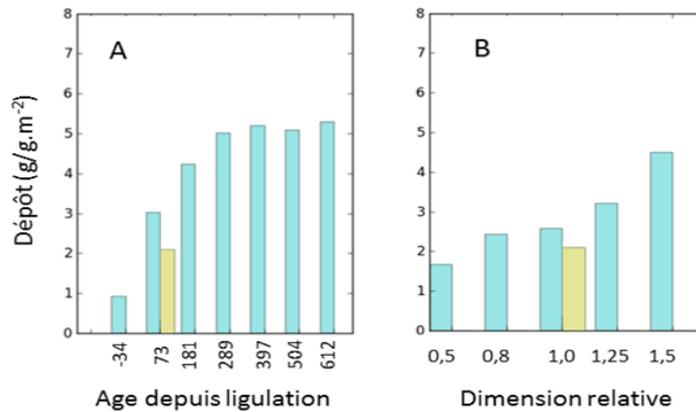
Après sa construction, puis son test avec des données, nous avons utilisé le modèle pour comprendre les effets de l'architecture sur le système et proposer une méthode d'optimisation des traitements.

**5.1 Analyse de sensibilité de la simulation d'interception de fongicide pour différents facteurs d'architecture des couverts.** Deux facteurs de variation d'architecture ont été testés : le stade de développement des plantes et la surface des feuilles.

**L'effet du stade de développement** a été simulé en faisant varier l'âge de la feuille drapeau de -40 dd (feuille en croissance) à + 600 dd depuis sa ligulation pour la date de pulvérisation (Figure 11A). L'interception simulée augmente fortement avec l'âge de la feuille. L'augmentation continue fortement après la ligulation de la feuille jusqu'à stabilisation environ 300 dd post ligulation. Les simulations montrent que cette augmentation est liée d'une part à la croissance de la feuille, puis à l'affaissement de la feuille au cours de son vieillissement mais également à la montée de l'entre nœud qui lui fait prendre une position supérieure dans le couvert. Ainsi, l'effet fort du stade de développement des plantes sur l'interception par les feuilles est lié à des changements d'architecture des plantes.

La sensibilité de l'interception de produit des feuilles pour **différentes surfaces de feuilles** montre que l'interception augmente logiquement avec la surface des feuilles. Pour la feuille drapeau, lors d'une pulvérisation au stade feuille drapeau étalée et pour une surface foliaire variant de 50% à 150%, l'interception augmente de l'ordre de 3 fois (figure 11B). Mais cet effet dépend du rang foliaire.

Cette analyse de sensibilité révèle que (1) le choix du stade des plantes pour le traitement est décisif dans l'optimisation de l'interception par les feuilles et (2) le profil de surfaces des feuilles est également un critère à considérer pour optimiser les traitements.



**Figure 11** : Simulation de la quantité de colorant interceptée par la feuille drapeau (barres bleues) pour des variations de A : stade de développement ( $x = \text{âge de la feuille drapeau depuis la ligulation}$ ), B : surface de la feuille (en  $x$  : variation des surfaces des feuilles) Chaque barre correspond à une valeur du paramètre d'architecture. Cas de la variété Tremie, saison 3, deuxième date de pulvérisation. La donnée d'interception de colorant est représentée en jaune. Projet ECHAP 2010-14.

**5.2 Identifier par simulation les dates de traitement et les traits d'architectures maximisant la protection.** Suite aux résultats de l'analyse de sensibilité montrant l'effet significatif de l'âge des feuilles sur l'interception des fongicides, nous avons développé une méthode d'optimisation.

**Méthode d'estimation de l'efficacité de protection.** Le modèle de simulation de l'architecture, couplé au modèle d'interception des fongicides sont utilisés pour adresser la question de l'optimalité de la date de traitement pour maximiser la protection.

La protection d'une feuille envers la maladie dépend de la quantité de produit déposée durant la pulvérisation, mais aussi de la date de ce dépôt par rapport à la vie de la feuille. Par exemple, un dépôt sur une feuille en croissance ne protégera que la partie émergée de la feuille. L'efficacité de protection définie dans l'équation 1 prend en compte ces facteurs :

$$\varepsilon_p = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_d \quad (1)$$

où  $\varepsilon_p$  est l'efficacité de protection,  $\varepsilon_i$  l'efficacité d'interception,  $\varepsilon_c$  l'efficacité de couverture et  $\varepsilon_d$  l'efficacité de durée de protection.

L'efficacité d'interception d'une feuille est fonction de l'exposition à la pulvérisation qui est déterminée par sa position dans le couvert et par sa surface projetée dans la direction de pulvérisation. Elle est obtenue en divisant le dépôt par unité de surface foliaire,  $q_d$  ( $\text{g.m}^{-2}$ ), calculée par le modèle d'interception, par la densité surfacique de produit,  $q_p$  ( $\text{g.m}^{-2}$ ) :

$$\varepsilon_i = \frac{q_d}{q_p} \quad (2)$$

L'efficacité de couverture est donnée par le ratio entre la surface émergée d'une feuille ( $S_{em}$ ) et sa surface atteinte lorsqu'elle sera ligulée et aura atteint sa surface max ( $S_{lig}$ ) :

$$\varepsilon_c = \frac{S_{em}}{S_{lig}} \quad (3)$$

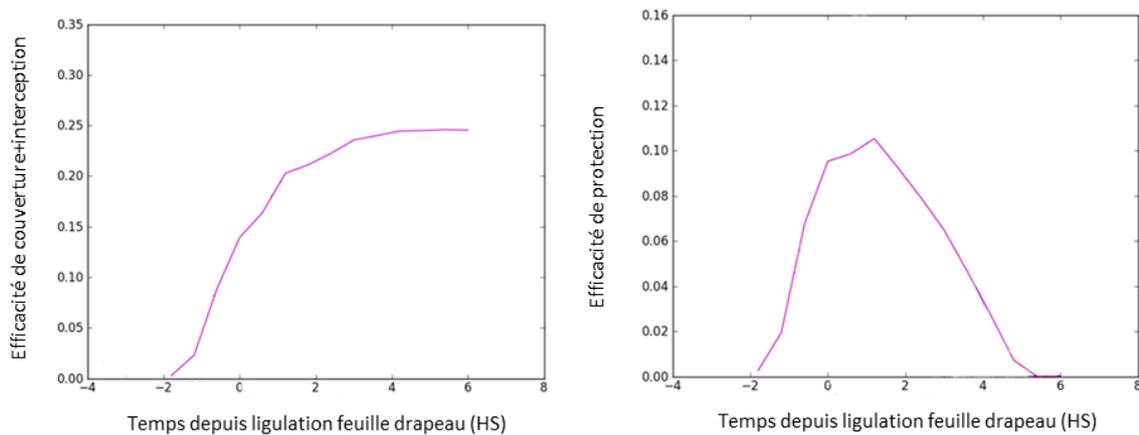
L'efficacité de protection est calculée comme le complémentaire à un du rapport entre l'âge d'une feuille depuis son émergence,  $a_{leaf}$  ( $^{\circ}\text{C.j}$ ) et sa durée de vie verte,  $D_v$  ( $^{\circ}\text{C.j}$ ) :

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{a_{leaf}}{D_v} \quad (4)$$

**Estimation de la date de traitement optimale.** La méthode présentée ci-dessus est utilisée pour la feuille drapeau, le cas de la variété Tremie en saison 3 de l'essai du projet. La simulation de l'efficacité d'interception et de couverture d'un traitement pour la feuille drapeau augmente jusqu'à 300 dd après

son émergence, puis plafonne (Figure 12A). Ceci est notamment lié à d'affaissement des feuilles avec l'âge. Mais, la prise en compte de la durée de protection fait apparaître des optimalités différentes (Figure 12B) : l'optimum d'application se situe alors environ à la moitié de la durée de vie verte et diminue ensuite assez rapidement révélant une fenêtre d'optimisation assez courte.

Le raisonnement réalisé dans cet exemple pour la feuille drapeau peut être conduit pour différentes feuilles et variétés et permet de raisonner les optimums de date de traitement pour ces différents cas. Les intérêts de cette méthode sont de pouvoir (1) décider de la variable à optimiser (ici par exemple protection de la feuille drapeau) et (2) de comparer des variétés et d'identifier l'effet de traits d'architecture sur cette optimisation.



**Figure 12 :** Réponses à la date de traitement fongicide de l'efficacité d'interception fois l'efficacité de couverture (gauche), et de l'efficacité de protection (droite) pour la feuille drapeau de Trémie, saison 3 du projet. Projets ECHAP 2010-2014.

## 6 Estimation des impacts environnementaux associés aux stratégies de traitement

L'évaluation du bilan environnemental des stratégies fongicides est basée sur l'utilisation de PRZM et de PEARL. L'évaluation a été réalisée pour les couverts des expérimentations de l'essai à Boigneville pour l'époxyconazole et le chlorothalonil. Les simulations sont réalisées du 1<sup>er</sup> sept au 31 août. En croisant les 3 architectures, les climats et les dates de traitements, 16 scénarios sont testés.

Les critères environnementaux sélectionnés sont les suivants :

- Concentration maximum dans l'eau du sol à 1 m (comparaison à 0.1 ou 0.5 µg/l),
- Quantité de pesticide dans la totalité du profil de sol à la fin de la simulation
- Cumul de volatilisation jusqu'à la fin de la simulation
- Cumul lixiviation à 1 m jusqu'à la fin de la simulation

Le bilan de masse pour le cas de blés Mercia, pour le 1<sup>er</sup> traitement, pour le chlorothalonil se répartit entre la volatilisation depuis la feuille, la pénétration dans la feuille et la dégradation dans le sol. Aucun des deux modèles (PEARL et PRZM) n'identifie de lixiviation du chlorothalonil à un mètre de profondeur dans le sol et cela quel que soit le scénario simulé. En termes de volatilisation, les pertes calculées sont similaires et significatives pour les deux modèles. Ces quantités sont un peu plus élevées que celles observées au champ. Enfin, le stock dans le sol en fin de simulation est du même ordre de grandeur pour les deux modèles quoique systématiquement plus élevé dans PEARL. La quantité apportée ainsi que l'année climatique ne jouent pas sur la concentration simulée dans l'eau du sol à 1m et les pertes par lixiviation qui restent nulles, mais elles influencent les pertes cumulées par volatilisation et le stock dans le sol en fin de simulation. L'architecture des blés influence également ces variables en lien avec le niveau d'interception des produits.

En conclusion, les molécules étudiées ne sont pas lixiviées en profondeur en raison sans doute d'une durée de simulation courte et du fait de capacités de rétention élevées pour ces deux molécules. Les pertes par volatilisation sont significatives pour le chlorothalonil. Quant à l'effet de l'architecture sur le devenir environnemental, ces modèles le répercutent *via* la distribution initiale du composé entre le couvert et le sol en lien avec le taux d'interception.

## Résultats majeurs, opérationnalité, perspectives

Le programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides sollicite des propositions concernant l'introduction de stratégies innovantes destinées à réduire l'utilisation des pesticides. Notre projet va dans une des directions indiquée dans le programme concernant l'application des approches épidémiologiques apportant des connaissances sur la dynamique des bioagresseurs permettant une optimisation de l'emploi des pesticides.

### Quatre types de résultats majeurs émergent de notre projet :

(1) Des expérimentations en conditions contrôlées ont permis de lever des verrous de connaissances sur la dynamique de courbure des feuilles, la dispersion fine des spores dans les architectures et la devenir des fongicides sur les feuilles. Ces trois points ont été utilisés pour la modélisation de l'effet de stratégie fongicide sur les épidémies pour des architectures variées dans la suite du projet.

(2) Les expérimentations de terrain confirment que **l'architecture des couverts influence le développement des épidémies**. Les effets sont multiples et en interaction avec le climat. On montre que même pour un climat défavorable, les blés nains sont nettement plus malades. De plus, on a montré que **l'architecture des blés influence aussi fortement l'interception des fongicides par les feuilles**. Ainsi les interceptions varient du simple au double selon les architectures obtenues dans les essais et entre les stades de développement. L'effet de densité de couvert n'est pas le seul effet : **le LAI (leaf area index) seul n'explique pas bien les différences d'interception entre les architectures** et les stades de développement. Notre projet **montre notamment l'importance forte de la courbure des feuilles** dans les interceptions foliaires. **Prendre en compte l'architecture des couverts est donc pertinent pour optimiser l'efficacité des traitements**.

(3) Le projet a également relevé le défi du développement d'un modèle qui prend en compte les interactions entre l'architecture des couverts, le développement de la septoriose et le fongicide appliqué. **Ce modèle a été confronté à un jeu de données de 3 années** obtenu lors du projet. Les simulations sont assez cohérentes avec les données. Cette modélisation dynamique du système « couvert 3D – épidémie – fongicide » a permis de :

1. **Evaluer l'effet des dates de traitement sur l'interception des produits** par les feuilles et donc identifier des optimisations de dates de traitement. Nous avons ainsi montré par simulation que l'interception de la feuille drapeau augmente fortement avec l'âge de la feuille et ne se stabilise que assez longtemps après sa ligulation..On note que la quantité interceptée peut doubler pour une date d'application décalée de seulement quelques jours
2. **Quantifier les effets des pratiques sur le développement des épidémies et l'interception des fongicides** et donc de raisonner et proposer des pratiques moins demandeuses. Par exemple nous avons montré que la densité d'axes du couvert, qui est directement lié à la densité de semis est clé pour l'interception par les feuilles. En effet, plus cette densité est forte, plus il y a de la compétition entre les feuilles et donc moins les feuilles reçoivent de produit.
3. **Quantifier l'effet des traits d'architecture influençant l'interception des fongicides** et donc potentiellement identifier et de hiérarchiser des traits clé pour classer les variétés et proposer des idéotypes. Par exemple, nous avons quantifié l'effet de la surface des feuilles sur l'interception des fongicides. Assez logiquement, plus les surfaces sont fortes, plus la feuille drapeau reçoit de produit.
4. Nous avons également proposé **une méthode d'optimisation des dates de traitements** qui prend en compte le modèle d'architecture et le modèle d'interception, en tenant compte de la durée de vie verte de la feuille. Appliqué à la feuille drapeau, nous avons montré par simulation que la protection est maximisée au milieu de sa vie verte et que cet optimum a lieu sur une période courte avec des efficacités de protection qui diminuent assez rapidement après le pic optimal définissant ainsi une fenêtre d'action assez limitée

(4) Enfin, notre projet propose des outils pour l'évaluation multicritère des stratégies. Des critères de type agronomique (rendement), épidémiologiques (AUDPC), de durée de vie des produits et enfin d'impact environnemental ont été proposés. Ils sont calculés à partir des données issues des simulations des stratégies fongicides. Par exemple une **évaluation environnementale des stratégies de traitements fongicides** pour l'expérimentation à Boigneville a été réalisée. Mettre en regard des critères variés d'évaluation est nécessaire pour la mise en place d'une agriculture conciliant production et qualité de l'environnement. Cependant, la durée du projet n'a pas permis de

tester des stratégies de traitement en mettant en regard les 4 critères proposés dans le projet pour comparer ces stratégies. C'est une des perspectives importantes de ce travail.

### Opérationnalité et perspectives.

Les expérimentations montrent un résultat inattendu : malgré une grande variabilité du dépôt entre les années et les variétés, il ressort une réponse précise sur le volume de bouillie : **celui-ci n'influence pas la quantité de produit intercepté par les feuilles**. C'est un résultat qui ouvre des perspectives pour le choix des stratégies de traitements dont le volume de bouillie est un des facteurs. La prise de conscience que les **taux d'interception par le couvert végétal sont assez bas dans les pratiques actuelles** est importante car elle permet d'envisager des développements qui vont permettre d'augmenter cette rétention. C'est une perspective clé mise en lumière par ce projet.

Les expérimentations montrent par contre un effet fort des variétés, via leur architecture notamment, et du stade de développement au moment du traitement sur l'interception des fongicides, facteurs qui devront donc être pris en compte dans la mise au point des stratégies de traitement fongicide. Le modèle développé dans ECHAP a réussi à intégrer ces facteurs et a été testé sur 3 années d'expérimentation. Le développement de ce modèle est une étape clé pour optimiser la réduction de l'usage des fongicides sur le blé. Cependant, les applications à visée opérationnelle d'un tel modèle ne seront effectives qu'après avoir menés des travaux complémentaires que nous présentons ci-dessous. Nous avons identifiés quatre perspectives, menant à l'opérationnalité :

1. Développer un simulateur opérationnel et validé des stratégies de traitement fongicide. Le projet a abouti au développement d'un prototype fonctionnel et établi la preuve de concept que le couplage de l'ensemble des briques de modélisation aboutissant à Septo3DFongi permet de réaliser des simulations croisant un nombre important de facteurs influant les épidémies de septoriose dont la stratégie de traitements fongicides, le scénario climatique et l'architecture des variétés. Ce modèle pourrait être utilisé pour évaluer in silico une grande variabilité de stratégies de traitements, mais deux points cruciaux requièrent un travail significatif au préalable. Premièrement, un travail d'ingénierie significatif est nécessaire pour développer un outil simple d'utilisation pour les prescripteurs et les expérimentateurs en protection des plantes. Deuxièmement, l'outil doit être paramétré et évalué sur une gamme plus large d'utilisation : il s'agit d'intégrer l'ensemble des fongicides utilisés par le monde agricole et de vérifier sa robustesse dans des contextes de pression épidémiques plus variés.

2. Evaluation d'idéotypes d'architecture et de génotypes en cours d'élaboration. Le modèle développé dans le projet ECHAP permet de tester un vaste nombre d'architectures de blé par des expérimentations virtuelles via la simulation. Ainsi le projet a permis de montrer par une analyse de sensibilité l'influence respective de traits tels que la dimension des feuilles, l'âge des plantes ou la densité d'axes dans l'interception des fongicides. C'est nécessaire afin de révéler des traits importants et de proposer des idéotypes "échappants et interceptants" pour l'innovation variétale. Cependant, ces idéotypes d'architecture peuvent se révéler "impossibles à construire en réalité" et une autre approche, complémentaire serait de s'appuyer sur la diversité architecturale des blés mondiaux existante, car celle-ci s'avère riche. Tester de nouveaux blés "expérimentalement" nécessite un travail amont de plus de 10 ans. L'utilisation de modèle tel que Septo3DFongi, pour classer, hiérarchiser et évaluer ces blés permettrait de disposer de simulation indiquant que ces variations d'architecture peuvent être pertinentes. Cela nous semble utile pour lancer des croisements et sélections dédiées.

3. La perspective de l'agriculture de précision. Les paramètres architecturaux sont aujourd'hui complexes à évaluer au champ, mais les projets actuels de phénotypage haut débit développent des outils de caractérisation de l'architecture des blés, par exemple avec les LiDars équipant la Phénomobile développée par Arvalis et l'INRA Avignon (UMT CAPTE). A moyen terme, il est permis d'imaginer de développer des prototypes couplant pulvérisation de précision et LiDars et permettant d'optimiser la pulvérisation en fonction des paramètres architecturaux. Le simulateur développé dans Echap serait un outil indispensable pour tester et optimiser un tel concept avant d'en lancer la fabrication.

4. Généralisation à d'autres pathosystèmes et passage aux échelles supérieures. L'utilisation de la plateforme OpenAlea pour développer nos outils favorise leur accessibilité et leur réutilisation pour d'autres pathosystèmes. Par exemple, un modèle de rouille brune et du complexe septoriose – rouille est en cours de développement sur la plateforme (G. Garin, thèse de doctorat en cours). Une fois fini, le modèle ECHAP permettra de tester les stratégies fongicides en considérant le complexe foliaire dans son ensemble ce qui ouvre des perspectives en terme d'application plus réaliste.

## Valorisations et partenariat mis en place

La **valorisation scientifique** sous forme de publications et communications à des congrès nationaux et internationaux a commencé et continue activement.

La participation d'un Institut Technique National (ARVALIS) et de son équivalent anglais (ADAS), avec des responsabilités dans la coordination du projet, ont été un gage du caractère appliqué des recherches. Ces Instituts, leurs réseaux d'expérimentation et de formation, constituent l'assurance de la valorisation du projet par le **transfert aux utilisateurs du monde agricole** (conseillers, sélectionneurs). Les publications professionnelles des Instituts techniques (Perspectives Agricoles, pour ARVALIS) ont commencé et vont permettre la diffusion d'articles de vulgarisation.

Une **valorisation indépendante de certains modèles** développés dans le projet est envisageable. En particulier, le modèle d'interception des pesticides par le couvert doit permettre d'affiner les démarches d'évaluation des risques pesticides dans le cadre de l'homologation. En outre, l'évaluation des risques de dispersion vers l'air est très frustrante, en absence d'outils suffisamment performants et reconnus pour estimer la volatilisation des pesticides à partir du feuillage. Sur ces deux aspects, l'AFFSA devrait être intéressée aux résultats et aux modèles mis au point dans le projet.

Ce projet a permis de monter un **réseau pluridisciplinaire et pluri-acteurs**. Le consortium associe des laboratoires de recherche publique (France et Pays Bas) et des instituts techniques (France et UK). Les partenaires du projet sont très complémentaires, et couvrent ensemble des domaines très variés. Ce réseau devrait être source d'innovation face aux nouvelles questions des acteurs et gestionnaires dans l'avenir.

## LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

#### Publications scientifiques

- Lichiheb N et al.. 2014. Adaptation of a resistive model to pesticide volatilization from plants at the field scale: Comparison with a dataset. *Atmos Environ* 83: 260-268
- Fournier C. et Pradal C. 2012. A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves. *PMA* 125-132

#### Ouvrages

- Présentation du projet ECHAP incluse dans le chapitre 3 ("Développer des pratiques agronomiques innovantes pour réduire l'utilisation des pesticides") d'un ouvrage de synthèse du programme Pesticides à paraître aux Editions Quae 2015. titre prévisionnel : *Pesticides : des impacts aux changements de pratiques - Bilan de quinze années de recherche pour éclairer la décision publique*

#### En préparation :

- Lichiheb N, et al. Measured leaf penetration and volatilization of chlorothalonil and epoxiconazole applied wheat leaves
- Danthony et al. Influence of wheat architecture and volume application on fungicide interception in the four upper leaves of the plants
- Robert C. et al. Using a 3D wheat plant model to simulate and understand fungicide interception : what are the key architectural traits?
- Garin G. et al. Simulating effect of wheat architecture on Septoria epidemics using a FSPM model

### COLLOQUES

#### Participations à des colloques

- Robert C. 2015. ECHAP : un projet pour identifier les possibilités de réduction de l'utilisation des fongicides en utilisant l'architecture des couverts. 45<sup>ème</sup> congrès du groupe français des pesticides. Versailles.
- Robert C. 2014. ECHAP Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitement optimales et couverts échappant aux maladies. Angers. Colloque « Pesticides : des impacts aux changements de pratiques » <http://www.programmepesticides.fr/Manifestations/Colloques-de-restitution/Angers-2014>
- Vidal, T. et al. 2014. Effet de l'architecture d'un couvert de blé et des caractéristiques pluviométriques sur la dispersion par éclaboussement de *Mycosphaerella graminicola* en conditions contrôlées, in: 10e Rencontres de Phytopathologie - Mycologie de La Société Française de Phytopathologie. Journées Jean Chevaugéon, Aussois, France.
- Lichiheb N, et al. 2014. Modelling pesticides volatilization from plants at the field scale: comparison of SURFATM and PEARL models. IUPAC. San Francisco (USA).
- Fournier, C., et al. 2013. An integrated and modular model for simulating and evaluating how canopy architecture can help reduce fungicide applications, in: FSPM2013 Proceedings (ISBN 978-951-651-408-9).
- Lichiheb N, et al. 2013. Development and validation of a mechanistic pesticide emission model at the field scale: toward a tool for evaluating the sources of atmospheric contamination by pesticides. International Conference on Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air University of York, UK September 2013: Presentation in the platform session on Emission and Fate of Pesticides in Air.
- Girardin, G. et al. 2012. Effect of wheat canopy architecture and rain characteristics on septoria splash-borne pycnidiospore, in: Plant and Canopy Architecture Impact on Disease Epidemiology and Pest Development. Presented at the Plant and Canopy Architecture Impact on Disease Epidemiology and Pest Development, Rennes, France.
- Robert, C., et al. 2012. ECHAP project: to reduce fungicide use by associating optimal treatment strategies and canopies promoting disease escape, Presented at Plant and Canopy Architecture Impact on Disease Epidemiology and Pest Development. Rennes, France.
- Girardin, G. et al. 2011. Effect of wheat canopy architecture and rain characteristics in splash

ECHAP L'architecture des couverts : un levier pour réduire l'utilisation des fongicides ?  
12/05/2015

dispersal of *Mycosphaerella graminicola* pycnidiospores, in: 8th International Symposium on *Mycosphaerella and Stagonospora* Diseases of Cereals. Mexico.

- C. Robert. 2011. Tours. ECHAP Réduire l'utilisation des fongicides en associant stratégies de traitement optimales et couverts échappant aux maladies. Colloque de présentation des projets financés dans APR 2009. <http://www.programmepesticides.fr/Manifestations/Colloques-de-restitution/Tours-2011>.

#### THESES

- Lichiheb N. 2011-2014. Développement et validation d'un modèle mécaniste de volatilisation des pesticides à l'échelle de la parcelle: vers un outil d'évaluation des sources de contamination de l'atmosphère. UMR-EGC, INRA-AgroParisTech (Thèse ADEME/INRA Département EA).

#### ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION

- Perriot B., Robert C. 2014. Pulvérisation en grandes cultures : Comprendre le dépôt pour mieux cibler l'application. Perspectives agricoles. Octobre 2014.
- **Fait Marquant Département EA INRA 2014.** ECHAP, un modèle pour identifier les possibilités de réduction de l'utilisation des fongicides en utilisant l'architecture des couverts.  
<http://www.ea.inra.fr/Toutes-les-actualites/FM-EA20134>
- F. Melix. : interview de C. Robert. 2015. Blé : favoriser l'interception des fongicides par la feuilles. France Agricole. Mars 2015.

#### AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS

#### PRESENTATIONS A DES INSTANCES PROFESSIONNELLES OU DE DECISION

- En préparation (parution prévue été 2015) : article de présentation du projet ECHAP dans la Lettre aux Entreprises de l'INRA

#### ENSEIGNEMENT - FORMATION

#### Rapports de stage Master 2.

- Girardin, G. 2011. "Effet De L'architecture Du Blé Et Des Caractéristiques De La Pluie Sur La Dispersion Par Éclaboussement Des Pycnidiospores De *Mycosphaerella Graminicola* ». Rapport de stage, Master FAGE. Université Henri Poincaré & ENSIA, 2011.
- Poidevin S. 2011. « La réduction des volumes de bouillie phytosanitaire a-t-elle un impact sur l'interception foliaire et l'efficacité face à *Septoria tritici* : cas de deux architectures de blé tendre d'hiver ? ». Rapport de stage. Master Biologie et Santé. Spécialité Sciences du végétal. Université Paris Sud 11, AgroParisTech, ENS CACHAN, 2011.
- Bouhlef, J. 2012. "Etude expérimentale du comportement de fongicides appliqués sur des feuilles de blé". Mémoire de fin d'études, Chimie Analytique et Instrumentation, Faculté des Sciences de Tunis ; UMR INRA AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures de Grignon, 84 p.
- Da Costa, J. 2012. "Influence de l'architecture du couvert de blé et de la technique de pulvérisation à bas volume sur l'interception foliaire du fongicide et le développement de *Septoria tritici*". MASTER Rennes, AgroCampus.
- Danthony-Romeuf, A. 2013. "Influence de l'architecture du couvert de blé et de la réduction du volume de bouillie sur l'interception foliaire d'un fongicide et le développement de *Septoria tritici*". MASTER ENSIA, Nancy.

#### AUTRES

-

# RESUMES

## En français

---

### RESUME COURT

L'objectif du projet ECHAP est d'identifier les possibilités de réduction de traitements fongicides via l'utilisation de l'architecture des couverts. Le projet a tout d'abord apporté des connaissances qui ont levé des verrous sur les mécanismes d'interaction. Il combine également 3 expérimentations opérationnelles au champ et un travail de modélisation du système. Les expérimentations au champ confirment l'effet de l'architecture sur le développement épidémique ainsi que l'effet marqué sur l'interception des fongicides et qui s'exprime clairement entre les variétés. Un modèle innovant et original simulant le système « architecture-épidémie-fongicide », septo3dfongi, a été développé. Il est opérationnel et permet de simuler et de raisonner des stratégies de traitements. Des critères d'évaluation multicritères des stratégies ont été également proposés.

### RESUME LONG

#### Contexte

Le cahier des charges de l'agriculture européenne a profondément évolué : il s'agit de promouvoir une agriculture qui concilie production avec qualité des produits et préservation de l'environnement. L'axe 3 du plan Ecophyto 2018 propose d'innover dans la conception et la mise au point de systèmes de culture économes en pesticides. Il incite à développer des approches agro-écologiques limitant la pression parasitaire, et à réorienter la sélection variétale vers des variétés plus résistantes.

C'est dans cette optique que nous avons développé le projet ECHAP qui porte sur les effets de l'architecture du couvert sur les épidémies et l'interception des fongicides. L'hypothèse du projet est que l'architecture des couverts est un levier pour réduire les besoins en fongicides. L'évolution des pratiques vers des préconisations en pesticide plus précises et plus localisées présente un potentiel pour tenir mieux compte des variables du couvert. De plus, le projet propose des critères variés pour évaluer les stratégies ce qui est un point clé pour proposer des stratégies durables

#### Objectifs

L'objectif du projet est d'identifier les possibilités de réduction de traitements fongicides via l'utilisation de l'architecture des couverts. Cet objectif se décline en cinq objectifs complémentaires : (1) lever des verrous de connaissance sur les interactions entre l'architecture des couverts, les épidémies associées, l'interception des fongicides et leur effet sur les pathogènes, (2) tester l'opérationnalité des idées du projet via une expérimentation au champ, (3) développer un outil de modélisation qui simule le développement d'un couvert de blé, les épidémies associées et les effets de traitements fongicides et y associer une évaluation des stratégies multicritère, (4) valider le modèle avec un jeu de données expérimentales et enfin (5) utiliser le modèle pour tester et optimiser des stratégies de traitement fongicides pour des architectures variées.

#### Méthodologie

Le pathosystème blé-septoriose a été retenu car la septoriose est en France et en Europe de l'Ouest, la maladie majeure du complexe foliaire des maladies du blé. Son contrôle est essentiellement basé sur la lutte chimique.

Le projet s'appuie sur des travaux de modélisation et d'expérimentations. Les expérimentations sont de deux types : (1) en conditions contrôlées, elles ont permis de comprendre et modéliser les mécanismes liant l'architecture des plantes, le développement du champignon et le devenir du fongicide sur les feuilles ; elles ont eu principalement lieu à l'INRA de Grignon, (2) au champ, elles ont permis de tester l'opérationnalité de l'approche sur le terrain. Elles ont eu lieu à Boignevilles (station ARVALIS institut de végétal) sur 3 années du projet.

#### Principaux résultats obtenus

**1 Etude des interactions « architecture x pathogènes x fongicide ».** Les expérimentations du projet ont permis de lever des verrous sur trois types de connaissances : (1) la dynamique de courbure des feuilles, trait d'architecture peu connu au début du projet, (2) l'effet de l'architecture sur la dispersion fine des spores par éclaboussure, et (3) le devenir des fongicides après leur dépôt sur la

feuille en terme de pénétration et de volatilisation. Ces connaissances ont été utilisées dans la suite du projet pour la modélisation du système.

**2 Test de stratégies de traitement fongicide avec des architectures variées.** Trois années d'expérimentations réalisées à Boigneville (Arvalis - Institut du végétal) ont permis de recueillir un jeu de donnée original avec des mesures (1) d'architecture des plantes, (2) de septoriose (3) d'interception de tartrazine par les feuilles et (4) météorologiques. En saison 1 les lignées Mercia sauvage et une lignée naine ont été utilisées. En saisons 2 et 3 la variété Tremie a été utilisée. Les mesures montrent que :

- les blés des trois années présentent des architectures contrastées.
- les épidémies sont également différentes pour les 3 saisons d'expérimentation. En saison 1, la maladie c'est assez peu développée du fait d'un climat assez défavorable, mais la sévérité de septoriose est tout de même plus forte sur la lignée naine. Les épidémies se sont bien développées lors des saisons 2 et 3 de l'essai.
- Le dépôt de tartrazine sur les feuilles des blés ne dépend pas du volume de la bouillie appliquée. Par contre, les quantités déposées varient fortement selon les architectures, les dates de traitement et les années avec des interactions entre ces facteurs. Considérer les différences de surface foliaire n'est pas suffisant pour expliquer les différences d'interception par les feuilles.

**3. Développement d'une boîte à outils logicielle pour la simulation et l'évaluation de stratégies de traitement dans des architectures variées.** Septo3DFongi est un modèle informatique qui simule, à l'échelle du couvert, en 3 dimensions et au cours du temps, le développement des plantes, de la septoriose, le devenir des fongicides sur les feuilles et l'effet des fongicides sur la septoriose. Pour le construire, différents modèles ont été couplés dans une plateforme (OpenAlea). Du point de vue informatique, 'Septo3DFongi' est conçu comme une application à composants indépendants inter-opérables,

D'un point de vue fonctionnel, ce modèle permet la simulation: (1) du développement de la plante en 3D, (2) du cycle infectieux de *Mycosphaerella graminicola*, (3) de la dispersion des spores lors des pluies, (4) de l'interception du fongicide par les plantes et les feuilles en particulier, (5) de la persistance du fongicide sur la feuille et (6) de l'effet des fongicides sur le cycle infectieux.

Des critères d'évaluation des stratégies ont été proposés. Il s'agit de critères agronomique, épidémique, environnemental et de durée de vie des produits. Ces critères permettent d'évaluer les stratégies sur des aspects variés.

Enfin, le modèle Septo3DFongi a été testé avec le jeu de données obtenu au champ lors du projet.

**4. Analyse de sensibilité de la simulation d'interception de fongicide pour différents facteurs d'architecture des couverts.** Deux facteurs de variation d'architecture ont été testés : le stade de développement des plantes et la surface des feuilles. On observe que l'interception simulée augmente fortement avec l'âge de la feuille drapeau. Le modèle permet de comprendre que cette augmentation est liée à la croissance de la feuille, à l'affaissement de la feuille au cours de son vieillissement mais également à la montée de l'entre nœud qui place la feuille au-dessus des autres. L'interception simulée augmente avec la surface des feuilles. Ainsi, le profil de surfaces des feuilles des variétés est un critère à considérer pour optimiser les traitements.

**5. Méthode d'optimisation de la date des traitements.** Le modèle de simulation de l'architecture, couplé au modèle d'interception des fongicides ont été utilisés pour adresser la question de l'optimalité de la date de traitement pour maximiser la protection. L'idée est que la protection d'une feuille envers la maladie dépend de la quantité de produit déposée durant la pulvérisation, mais aussi de la date de ce dépôt par rapport à la vie de la feuille. Par exemple, un dépôt sur une feuille en croissance ne protégera que la partie émergée de la feuille. Appliquée à la feuille drapeau de la variété Tremie, la méthode montre qu'il existe une fenêtre de temps assez serrée, peu longtemps après la ligulation de la feuille qui optimise la protection. Le raisonnement peut être conduit pour différentes feuilles et variétés. Les intérêts de cette méthode sont de pouvoir (1) décider de la variable à optimiser (ici par exemple protection de la feuille drapeau,) et (2) de comparer des variétés et d'identifier l'effet de traits d'architecture sur cette optimisation.

**6 Estimation des impacts environnementaux associés aux stratégies de traitement.** L'évaluation du bilan environnemental des différentes stratégies fongicides est basée sur l'utilisation des modèles PRZM et de PEARL. L'évaluation a été réalisée pour les couverts des expérimentations réalisées à

Boigneville pour l'époxyconazole et le chlorothalonil. Les critères environnementaux sélectionnés sont : (1) concentration maximum dans l'eau du sol à 1 m, (2) quantité de pesticide dans la totalité du profil de sol à la fin de la simulation, (3) cumul de volatilisation jusqu'à la fin de la simulation et (4) cumul lixiviation à 1 m jusqu'à la fin de la simulation.

Les simulations montrent que les molécules étudiées ne sont pas lixiviées en profondeur en raison peut être d'une durée de simulation courte et du fait de capacités de rétention élevées pour ces deux molécules. Les pertes par volatilisation sont significatives pour le chlorothalonil, Quant à l'effet de l'architecture sur le devenir environnemental, ces modèles le répercutent *via* la distribution initiale du composé entre le couvert et le sol en lien avec le taux d'interception.

### **Sorties opérationnelles pour décideurs, applications éventuelles**

Les résultats du projet montrent que l'architecture des couverts influence le développement des épidémies : même pour un climat défavorable, les blés nains sont nettement plus malades. L'architecture des blés influence aussi fortement l'interception des fongicides par les feuilles : les interceptions varient du simple au double selon les architectures dans les essais. Le projet montre l'importance de la courbure des feuilles dans les interceptions foliaires. Les expérimentations montrent également un résultat inattendu : malgré une grande variabilité du dépôt entre les années et les variétés, il ressort une réponse précise sur le volume de bouillie : celui-ci n'influence pas la quantité de produit intercepté par les feuilles. C'est un résultat qui ouvre des perspectives pour le choix des stratégies de traitements dont le volume de bouillie est un des facteurs.

Le projet a également abouti au développement d'un modèle innovant et original qui prend en compte les interactions entre l'architecture des couverts, le développement de la septoriose et le fongicide appliqué. Des critères d'évaluation agronomique, épidémique et environnemental ont été associés. Ce modèle a été confronté à un jeu de données de 3 années obtenu lors du projet. Les simulations sont assez cohérentes avec les données. Cette modélisation dynamique a permis de : (1) montrer que l'interception de la feuille drapeau augmente fortement avec l'âge de la feuille et ne se stabilise qu'assez longtemps après sa ligulation. La quantité interceptée peut doubler pour une date d'application décalée seulement de quelques jours ; (2) quantifier l'effet de la densité d'axes du couvert sur l'interception par les feuilles : plus la densité est forte, plus il y a de la compétition entre les feuilles et donc moins les feuilles reçoivent de produit. Et (3) de quantifier l'effet de la surface des feuilles sur l'interception des fongicides. Assez logiquement, plus les surfaces sont fortes, plus la feuille drapeau reçoit de produit.

Nous avons proposé une méthode d'optimisation des dates de traitements qui prend en compte le modèle d'architecture et le modèle d'interception, en tenant compte de la durée de vie verte de la feuille également. Appliqué à la feuille drapeau, nous avons montré par simulation que la protection est maximisée, pour cette feuille au milieu de sa vie verte et que cet optimum a lieu sur une période assez courte avec des efficacités de protection qui diminuent assez rapidement après le pic optimal définissant ainsi une fenêtre d'action assez limitée

Le développement de ce modèle est une étape clé pour optimiser la réduction de l'usage des fongicides sur le blé. Nous avons identifié 4 pistes de perspectives vers l'opérationnalité qui sont : (1) Développer un simulateur opérationnel et validé des stratégies de traitement fongicide, (2) Evaluation d'idéotypes d'architecture et de génotypes en cours d'élaboration, (3) La perspective de l'agriculture de précision, et (4) la Généralisation à d'autres pathosystèmes et aux complexes parasitaires.

### **MOTS-CLES**

Réduction des traitements, fongicides, architecture, échappement, date de traitement, interception, modalité d'application, septoriose, blé, impact environnemental, optimisation

## In English

---

### ABSTRACT

#### Context

The goals of European agriculture have changed: current agriculture needs to reconcile production with product quality and environmental protection. Axis 3 of the French government plan Ecophyto2018 proposes to develop novel cropping systems with reduced needs in pesticides. The plan encourages the development of agro-ecological approaches limiting pathogen pressure, and reorienting plant breeding to more resistant varieties.

It is in this light that we have developed the ECHAP project on the effects of canopy architecture on epidemics and fungicides interception. The project's hypothesis is that architecture is a lever to reduce fungicide needs. In addition, the project proposes to evaluate strategies in terms of environmental impact, which is a key point for developing sustainable strategies.

#### Objectives

The project objective is to identify opportunities to reduce fungicide needs through the use of canopy architecture. This objective has five complementary axes: (1) to study the interactions between architecture, epidemics, fungicides interception and effects on pathogens, (2) to test the operability of the project ideas via a field experiment during three growing seasons, (3) to develop a modeling tool that simulates the development of a wheat canopy, epidemics associated and effects of fungicides and propose an assessment of strategies that includes an environmental report, (4) to validate the model with data from field experiment and (5) to use the model to test and to optimize fungicide treatment strategies for various wheat architectures.

#### Methodology

The pathosystem-wheat septoria was chosen because septoria is in France and in Western Europe the major foliar disease of wheat. Its control is mainly based on chemical control.

The project is based on combining modeling and experimentation. The experiments are of two types: (1) experiments under controlled conditions that aim to understand and model the mechanisms linking plant architecture, fungal development and fate of the fungicide on the leaves; they took place mainly at INRA Grignon; (2) field experiments, that were used to test the operational approach. These were held in Boignevilles (ARVALIS institut du végétal) over 3 years of the project

#### Main results

- 1. Study of the interactions between "architecture x fungus x fungicide."** Project experiments led to (1) characterize the leaf curvature dynamics: leaves emerge vertically and collapse when aging, (2) quantify architecture's effect on spore dispersal by splash, and (4) quantify the fate of fungicides in the leaf after deposition.
- 2. Test of fungicide strategies on various wheat architectures.** A three-year experiment conducted at Boigneville (Arvalis) has yielded an original dataset with measurements of: (1) plant architecture, (2) septoria development, (3) tartrazine foliar interception, and (4) weather. In season 1 wild Mercia lines and a dwarf isogenic line were used. In seasons 2 and 3 the variety Tremie was used. Measurements show that:
  - Architecture of wheat lines are contrasted
  - Epidemics are also different for the 3 experimental seasons. In season 1, the disease is relatively underdeveloped due to a rather unfavorable climate, but the severity of Septoria is still stronger on the dwarf line.
  - Deposition of tartrazine on wheat leaves does not depend on the volume of the applied product. However, the amounts deposited on the leaves vary greatly depending on architecture, application date and year. Considering the differences in leaf area is not sufficient to explain the different interception by the leaves.
- 3. Development of a software toolbox for the simulation of treatment strategies in various architectures.** Septo3DFongi is a model that simulates wheat 3D development, septoria epidemics over time, the interception and fate of fungicides on the leaves and the effect of fungicides on the fungus. To build the model, different sub-models have been coupled on a software platform (OpenAlea). Our model allows the simulation of: (1) the development of the

plant in 3D, (2) the infection cycle of *Mycosphaerella graminicola*, (3) the dispersal of spores during rainfall, (4) interception of the fungicide by plants (5) the persistence of the fungicide on the leaves (6) the effect of fungicides on the infection cycle. Agronomic, epidemic and environmental criteria have been proposed to evaluate the treatment strategies. The model has been tested with the data set obtained during the field experiments.

4. **Analysis of sensitivity of fungicide interception simulation to architectural factors.** Two factors of architecture were tested: plant development stage and the leaf surface. We observed that the simulated interception increases sharply with flag leaf age at deposition. Simulations show that this increase is due to the collapse of the leaf during aging and also to the rise of the node. The simulated interception increases (as expected) with the surface of the leaves. Thus, the leaf surfaces profile is a factor to consider in optimizing treatment.
5. **Optimization method for the date of treatment.** The architecture simulation sub-model, coupled with the fungicide interception sub-model were used to address the question of the optimality of the application date to maximize foliar protection. The idea is that the protection of a leaf from the disease depends on the amount of product deposited during spraying, but also on the date of the deposit. For example, a deposit on a growing leaf will only protect the emerged part of the leaf. Applied to the flag leaf (season 3 of the trial), the method shows that there is a rather tight time window, not long after leaf ligulation, which maximizes protection. Interests of this method are (1) to decide the variable to be optimized (eg protecting the flag leaf) and (2) to compare the cultivars and to identify the architectural traits for optimization.
6. **Estimation of the environmental impacts.** The evaluation of the environmental impact of fungicides strategies is based on using the PRZM and PEARL models. The evaluation was conducted for the experiments carried out at Boigneville for both epoxiconazole and chlorothalonil. The selected environmental criteria are: (1) maximum concentration in soil water to 1 m, (2) amount of pesticide in the entire soil profile, (3) cumulative volatilization, and (4) cumulative leaching to 1 m. Simulations show that the two studied fungicides are not leached in depth but this may be due to a short simulation period. Volatilization losses are significant for chlorothalonil.

**Operational outputs for policy makers, potential applications.** The project shows that canopy architecture influences the development of epidemics. The effects are multiple and in interaction with the environment. We show that even for an unfavorable climate, dwarf wheats are more diseased. The architecture of wheat also strongly influences the interception of fungicides by leaves. Interceptions vary from simple to double depending on architecture in the experiments. The project shows the importance of the foliar curvature in foliar interceptions. The experiments also show an unexpected result. Despite large between-years variability in the deposit, a clear result emerges concerning the mixture volume, which appears not to influence the amount of product intercepted by the leaves. This is a result that opens perspectives for the choice of treatment strategies, in which mixture volume is one of the factors taken into account.

The project also resulted in the development of an original and innovative model that takes into account the interactions between canopy architecture, the development of septoria and fungicides. This model has been tested with the data set obtained during three years of the project. The simulations are fairly consistent with the data.

This dynamic modeling of the system "3D canopy - epidemic - fungicide" has: (1) shown that the interception by the flag leaf rises sharply with leaf age at application: the intercepted amount can double for a date of application shifted only a few days, (2) shown that the canopy axis density is key to the interception by leaves: the higher the density, the more competition between the leaves and thus less foliar interception, and (3) quantified the effect of the leaf surface on the interception of fungicides. Unsurprisingly, for larger surfaces, the flag leaf receives more product. We have proposed an optimization method of the treatment date. It takes into account the architectural model and fungicide interception model. Applied to the flag leaf, we have shown by simulation that protection is maximized in the middle of the green life and that this optimum occurs over a short period with protection efficiencies that reduce fairly quickly after the optimal peak thus defining a relatively limited action window.

Finally, our project proposes an evaluation of fungicides strategies with the associated environmental impact. For this we compared simulation of two models (PEARL and PRZM) for two contrasting fungicides. Evaluation against multiple criteria is required for the establishment of an agriculture that reconciles production and environmental quality.

ECHAP L'architecture des couverts : un levier pour réduire l'utilisation des fongicides ?  
12/05/2015

The development of our model is a key step towards optimising the reduction of fungicide use on wheat. We have identified four perspectives for obtaining operationality: (1) development of an operational and validated simulator of fungicide treatment strategies; (2) Evaluation of prototypic architecture ideotypes and genotypes (that are being developed in the lab); (3) precision agriculture; (4) the generalisation of our work to other pathosystems and to co-infection by multiple pathogens.

**KEY WORDS**

Fungicides, canopy architecture, disease escape, application date, fungicide interception, septoria, wheat, environmental impact, optimization