



## ECHAP ” L’architecture des couverts végétaux : un levier pour réduire l’utilisation des fongicides ? ”

Corinne Robert, Christian Fournier, Carole Bedos, David Gouache, Benjamin Perriot

► **To cite this version:**

Corinne Robert, Christian Fournier, Carole Bedos, David Gouache, Benjamin Perriot. ECHAP ” L’architecture des couverts végétaux : un levier pour réduire l’utilisation des fongicides ? ”. [Rapport de recherche] 1879/10, INRA. 2015, pp.43. <hal-01253658>

**HAL Id: hal-01253658**

**<https://hal.inria.fr/hal-01253658>**

Submitted on 11 Jan 2016

**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.

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

Programme Evaluation et réduction des risques liés à  
l'utilisation des Pesticides  
APR 2009

Rapport Scientifique – 23 Janvier 2015

**Corinne Robert (coordinatrice), Christian Fournier, Carole Bedos, David Gouache, Benjamin Perriot**

**Participants au projet :**

UMR 1402 INRA AgroParisTech Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes ECOSYS : Abichou M., Andrieu B. Bancal M.O., Barriuso E., Bedos C., Benoit P., Bergheaud V., Bidon M., Chapuis R., Chambon C., Durand B., Gagnaire N., Girardin G., Jean Jacques J., Lichiheb N., Mamy L., Ney B., Poidevin S., Pot V., Pointet S. Saint Jean, S. Robert C.

UMR 1290 INRA-AgroParisTech BIOlogie et GEstion des Risques en agriculture – Champignons pathogènes des Plantes (BIOGER-CPP) : Walker A.S.

UMR 1095 INRA-Université Clermont II, «Génétique, Diversité et Ecophysiologie des Céréales» (GDEC) : Salse J.

CNRS UMR 6505 CNRS-Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II) : Ter Halle A., Richard C.

UMR CIRAD-INRA-IRD-Montpellier SupAgro-Université Montpellier 2 développement et amélioration des plantes (DAP) : Pradal C. et Fournier C.

ARVALIS – Institut du végétal : Perriot B., Gouache D., Poidevin S., da Costa J., Danthony A., Gaudillat N.

IRSTEA. UMR IRSTEA-Montpellier SupAgro Information et Technologie pour les Agro-Procédés (ITAP) : Bonicelli B., Cotteux E.

ADAS (UK) High Mowthorpe, Duggleby, Malton: Paveley N., Smith J.

ALTERRA - Research Institute for the Green World (Pays Bas) Centre for Water and Climate (Wageningen) : van den Bergh E.

## SOMMAIRE

<b>I. Contexte et enjeux du projet</b>	<b>3</b>
<b>I1. Contexte socioéconomique</b>	<b>3</b>
<b>I2. Contexte scientifique</b>	<b>3</b>
<b>II. Objectifs, méthodologie et organisation du projet</b>	<b>5</b>
<b>II1. Objectifs</b>	<b>5</b>
<b>II2. Organisation</b>	<b>5</b>
<b>II3. Sites et objets d'étude</b>	<b>6</b>
<b>II4. Méthodologie</b>	<b>7</b>
<b>III. Résultats</b>	<b>8</b>
<b>III1. Etude des interactions « architecture x pathogènes x fongicide »</b>	<b>9</b>
III1a. Architecture des lignées de blé du projet	9
III1b. Dispersion de spores dans des architectures contrastées de blé	10
III1c. Devenir du fongicide après application sur la feuille	12
<b>III2. Test de stratégies de traitement fongicides avec des architectures variées</b>	<b>13</b>
III2a. Développement des architectures des blés	15
III2b. Développement des épidémies	18
III2c. Interception de colorant sur les différentes feuilles des plantes	19
<b>III3. Développement d'une boîte à outils logicielle pour la simulation et l'évaluation de stratégies de traitement dans des architectures variées</b>	<b>22</b>
III3a. Simulation de stratégies de traitements dans des architectures variées.	22
III3b. Evaluation multicritères des stratégies de traitements	28
<b>III4. Test du modèle Sepot3DFongi pour sa capacité à prédire les données de l'essai de Boigneville</b>	<b>29</b>
III4a. Simulation de l'architecture des couverts	29
III4b. Simulation de l'interception de colorant par les feuilles	31
<b>III5. Utilisation du modèle pour optimiser les traitements via l'architecture des couverts</b>	<b>32</b>
III5a. Analyse de sensibilité de la simulation d'interception de fongicide pour différents facteurs d'architecture des couverts	32
III5b. Identifier par simulation les dates de traitement et les traits d'architectures maximisant la protection	33
<b>III6. Estimation des impacts environnementaux associés aux stratégies de traitement</b>	<b>34</b>
<b>IV. Conclusions : Résultats majeures, opérationnalité et perspectives</b>	<b>37</b>
<b>IV.1 Résultats majeurs du projet</b>	<b>37</b>
<b>IV.2 Opérationnalité et perspectives</b>	<b>39</b>
<b>IV.3 Actions de transfert de connaissance ou de valorisation</b>	<b>40</b>
<b>Références</b>	<b>41</b>
<b>Annexe : partie confidentielle</b>	<b>43</b>

## I. Contexte et enjeux du projet

### I1. Contexte socioéconomique

Le cahier des charges de l'agriculture européenne a évolué : il s'agit de promouvoir une agriculture durable qui concilie production et rentabilité avec qualité des produits et préservation de l'environnement. Ces priorités apparaissent dans la directive européenne « Pour une utilisation durable des pesticides », dans le Grenelle de l'environnement et dans le plan Ecophyto 2018. Ce dernier a pour objectif de réduire la dépendance aux pesticides des systèmes de production agricole, avec une diminution significative des usages des produits de synthèse. Pour cela, 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. En particulier, il incite à développer des approches agro-écologiques limitant la pression parasitaire et améliorant sa gestion, et à réorienter la sélection variétale vers des variétés plus résistantes. Pour cela, il demande de mobiliser la recherche fondamentale sur l'écophysiologie de la plante et de ses agresseurs et l'épidémiologie des maladies.

En France environ 50 % des 78000 T/an de matières actives sont des fongicides. Sur céréales à paille, l'utilisation moyenne est de 0,5 kg/ha et les fongicides sont principalement des produits organiques de synthèse. La diminution des quantités de pesticides appliquées sur blé depuis 10 ans est largement due à l'introduction de matières actives plus efficaces à moindre dose, mais il y a peu d'évolution des IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement) (Aubertot et al. 2005 ; Brunet et al. 2008). Les IFT sur blé sont assez faibles comparés à ceux d'autres grandes cultures. Les fongicides représentent de l'ordre de 2/3 de ces traitements. En raison de l'importance des surfaces concernées (de l'ordre de 4.8 Mha en blé), les fongicides appliqués sur blé représentent cependant un peu plus de 50% du total des fongicides appliqué sur grandes cultures. Ainsi, diminuer, même modérément, les traitements fongicides sur blé aura une répercussion significative sur notre territoire.

Pour réduire le recours à la protection chimique, il est possible d'optimiser les traitements fongicides et de les associer à l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes et à la régulation des bio-agresseurs par des techniques culturales. Par exemple, des itinéraires techniques économes en intrants associés à des variétés rustiques de blé tendre, plus résistantes, permettent de réduire les traitements fongicides (Rolland et al. 2003). Cela ouvre des perspectives en termes de réduction de fongicides liées à la prise en compte de caractéristiques variétales.

Les propriétés du couvert végétal qui influencent les épidémies sont nombreuses : le niveau de résistance, la morphologie et l'état physiologique des organes, l'architecture des couverts. L'architecture influence les épidémies mais également l'interception des fongicides et donc l'efficacité des traitements. Cependant les interactions « architecture du couvert – développement épidémique – interception des fongicides » sont aujourd'hui peu étudiées. Une marge de réduction de pesticides est également possible *via* les modalités d'application : certains agriculteurs disent maîtriser les maladies du feuillage avec des doses par hectare équivalentes à 20% de celles classiquement utilisées, grâce à des techniques d'application à bas volume. Mais aucune publication ne le confirme. L'élaboration de stratégies raisonnant *architecture du couvert, date, dose et modalité d'application* devrait permettre de diminuer les applications en fongicides dans les couverts présentant des propriétés échappantes\* aux maladies. C'est dans cette optique que nous avons développé le projet ECHAP (2010-2014) qui repose sur l'hypothèse que l'architecture des couverts est un levier pour réduire les besoins en fongicides des couverts cultivés.

### I2. Contexte scientifique

Actuellement, les préconisations de traitements fongicides prennent principalement en compte le risque climatique et fixent les dates de traitements en fonction du stade phénologique des peuplements. Ces préconisations aboutissent en général à des traitements systématiques et assez nombreux pour les cultures intensives classiques. *L'état des connaissances suggère qu'il est possible de raisonner mieux le risque réel en tenant compte de l'architecture des peuplements végétaux.*

Afin d'optimiser les stratégies fongicides, il est nécessaire d'évaluer leur efficacité. Actuellement cette évaluation est principalement réalisée sur une base annuelle, en considérant leurs effets sur les rendements et avec une prise en compte très faible des impacts sur l'environnement. *Développer des*

---

\* Un couvert « échappant » est un couvert qui par ses caractéristiques permet de diminuer le développement des épidémies

*outils d'évaluation multicritères permettant d'évaluer sur le moyen terme les stratégies fongicides apparaît comme un point clé pour proposer de nouvelles stratégies durables.*

### **L'architecture des couverts joue un rôle clé dans le développement des épidémies.**

Le peuplement végétal est le milieu de vie du pathogène : l'architecture détermine la quantité de substrat, sa localisation et les distances à parcourir entre tissus infectés et tissus sains à coloniser. Chez le blé, d'assez nombreuses études révèlent que l'architecture module significativement les épidémies de septoriose. Dans les années 70, Eyal (1971) note que l'introduction des variétés de blé naines est corrélée à une explosion de l'incidence de la septoriose. Bahat et al. (1980), puis Lovell et al. (1997 ; 2004) montrent que plus les feuilles successives sont proches, plus la propagation du parasite vers le haut est facilitée, mais Lovell et al. (1997) proposent une hypothèse liée à la vitesse d'extension de la tige et non plus à la hauteur finale des plantes. L'effet est toutefois dépendant du scénario climatique. Shaw et Royle (1993) observent des niveaux de septoriose plus élevés pour des semis de blé plus précoces. Ils mettent en cause le plus fort tallage hivernal, la plus faible vitesse d'extension de la tige et la plus longue durée de vie des feuilles ; mais leurs travaux ne permettent pas de décorréliser ces effets. Un modèle qui couple un modèle 3D de développement de l'architecture du blé et un modèle épidémique a été développé afin de mieux comprendre l'effet de l'architecture sur les dynamiques épidémiques (Septo3D, Robert et al. 2008). Des auteurs proposent d'utiliser l'architecture pour créer des couverts échappants (Lovell et al. 2004 ; Ando et al. 2005).

*Il est établi que les pratiques culturales peuvent moduler via l'architecture le risque épidémique, mais les résultats sont irréguliers. L'utilisation d'architectures échappantes, prises isolément, n'apparaît pas comme une alternative aux traitements fongicides. Par contre il paraît réaliste de les utiliser pour réduire les traitements. En outre une meilleure connaissance des contributions des différentes variables d'architecture à l'échappement permettrait de mieux cibler les pratiques. La diversification des systèmes agricoles afin qu'ils soient plus adaptés localement et plus durables va s'accompagner de préconisations en pesticides plus précises et plus localisées. Cette évolution tendancielle des pratiques présente un potentiel pour tenir mieux compte des variables du couvert.*

### **L'architecture des couverts influence l'interception du fongicide et sa répartition sur la plante.**

La distribution verticale du produit sur la plante conditionne la fraction de pesticide ayant effectivement atteint les pathogènes et le devenir du produit, donc son impact environnemental. La répartition entre différents compartiments de l'environnement est extrêmement variable et influencée (i) par le procédé de pulvérisation, (ii) les caractéristiques physico-chimiques de la préparation, (iii) l'architecture du couvert, (iv) l'adaptation et le réglage de l'appareil, (v) les mouvements des appareils et (vi) les conditions climatiques (Aubertot et al. 2005).

Lors d'une pulvérisation, l'interception du pesticide par le couvert et la fraction arrivant au sol sont souvent estimées empiriquement ou à dire d'expert. Les mesures quantitatives de ce que le couvert a réellement reçu sont rares et on connaît mal l'effet de l'architecture des couverts sur l'interception des produits. Henriot et al. (2005), ont étudié la répartition verticale de l'époxiconazole et du krésoxim-méthyl appliqués sur blé et montrent un effet significatif du stade de développement de la plante.

*Prendre en compte l'effet de l'architecture des couverts sur l'interception des produits, en interaction avec le type de matériel d'application utilisé, est une piste afin d'améliorer l'efficacité des traitements fongicides en favorisant l'accès des produits aux feuilles cibles. Une interception du produit optimisée devrait permettre de diminuer les quantités appliquées et d'augmenter l'efficacité des traitements.*

### **Evaluation environnementale des stratégies fongicides.**

Après application sur un couvert végétal, le devenir environnemental d'un fongicide dépend de son devenir 1) sur le couvert (et donc de sa capacité à pénétrer dans la plante, à se dégrader, à se volatiliser vers l'atmosphère ou être lessivé par la pluie (Willis et al., 1987)) et 2) dans le sol pour la fraction non interceptée par le couvert. Les modèles préconisés pour l'homologation des produits phytosanitaires, tels que PEARL (Leistra et al., 2001) ou PRZM (Carsel et al., 1998) décrivent globalement ces comportements. Il faut cependant noter qu'ils restent relativement frustrés en ce qui concerne le devenir sur la feuille (sauf PEARL qui comprend des développements spécifiques) car ils sont confrontés aux limites des connaissances sur certains processus ayant lieu sur le feuillage (Scholtz et al., 2002 ; Leistra et al., 2005) et à la confidentialité sur la formulation des produits qui a un effet sur le comportement des molécules.

Une première limite concerne l'estimation de la répartition entre (i) la fraction résidant à la surface des feuilles potentiellement concernée par la volatilisation, la photodégradation et le lessivage et (ii) la fraction ayant pénétrée dans la plante, potentiellement mobilisable pour se déplacer par translocation

(de Ruiter, 2004). Une seconde limite porte sur l'estimation des réactions de photodégradation sur la végétation. Celle-ci dépend de l'absorption de la lumière solaire par les matières actives tant qu'elles sont à la surface des feuilles, voire dans la couche épicuticulaire (Schreiber et al. 1997) et de la réponse biologique du végétal (Katagi, 2004). Des films de cires sur lesquels sont déposées les matières actives placées en réacteur photochimique constituent un système modèle expérimental approprié à la caractérisation de ces réactions et des résultats obtenus précédemment pourront être valorisés dans le projet (ter Halle et al., 2006).

La volatilisation depuis le couvert peut représenter jusqu'à 10% de la dose appliquée en quelques jours ou semaines selon la nature physico-chimique du composé, le mode d'application et les conditions pédoclimatiques (van den Berg et al., 1999). Son intensité et sa dynamique dépendent aussi de la distribution verticale du produit dans le couvert, ce qui a été récemment pris en compte dans PEARL grâce à l'introduction d'un réservoir de pesticides « moins exposés » (van den Berg et al., 2008). *Le lessivage par la pluie* est une source potentiellement significative de diffusion des pesticides vers le sol et les eaux. Ce phénomène est pris en compte dans les modèles PRZM et PEARL par des équations simples.

*Intégrer une estimation du bilan environnemental des stratégies de traitements fongicides est précieux pour le développement de stratégies durables de traitement. C'est un des objectifs du projet.*

## II. Objectifs, méthodologie et organisation du projet

### II1. Objectifs

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. Une évaluation des stratégies englobant des critères agronomiques et environnementaux est proposée.

Cet objectif se décline en cinq axes/objectifs complémentaires:

- (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 des stratégies
- (4) Valider le modèle développé à l'échelle de la parcelle avec les données de terrain
- (5) Utiliser le modèle pour tester des stratégies de protection pour des architectures variées.

Les 5 axes sont fortement connectés. Tout d'abord, les connaissances acquises sur le système dans l'axe 1 décrit sont nécessaires pour mieux comprendre ce qui se passe dans les expérimentations au champs du projet de l'axe 2 et pour paramétrer les fonctions qui décrivent ces processus dans le modèle développé dans le projet à l'échelle de la parcelle dans l'axe 3. Les expérimentations aux champs de l'axe 2 sont utilisées pour valider le modèle développé dans le projet à l'échelle de la parcelle dans l'axe 4. Enfin le développement du modèle de l'axe 3 et sa validation de l'axe 4 est un prérequis pour les simulations qui permettent d'analyser le système dans l'axe 5.

### II2. Organisation

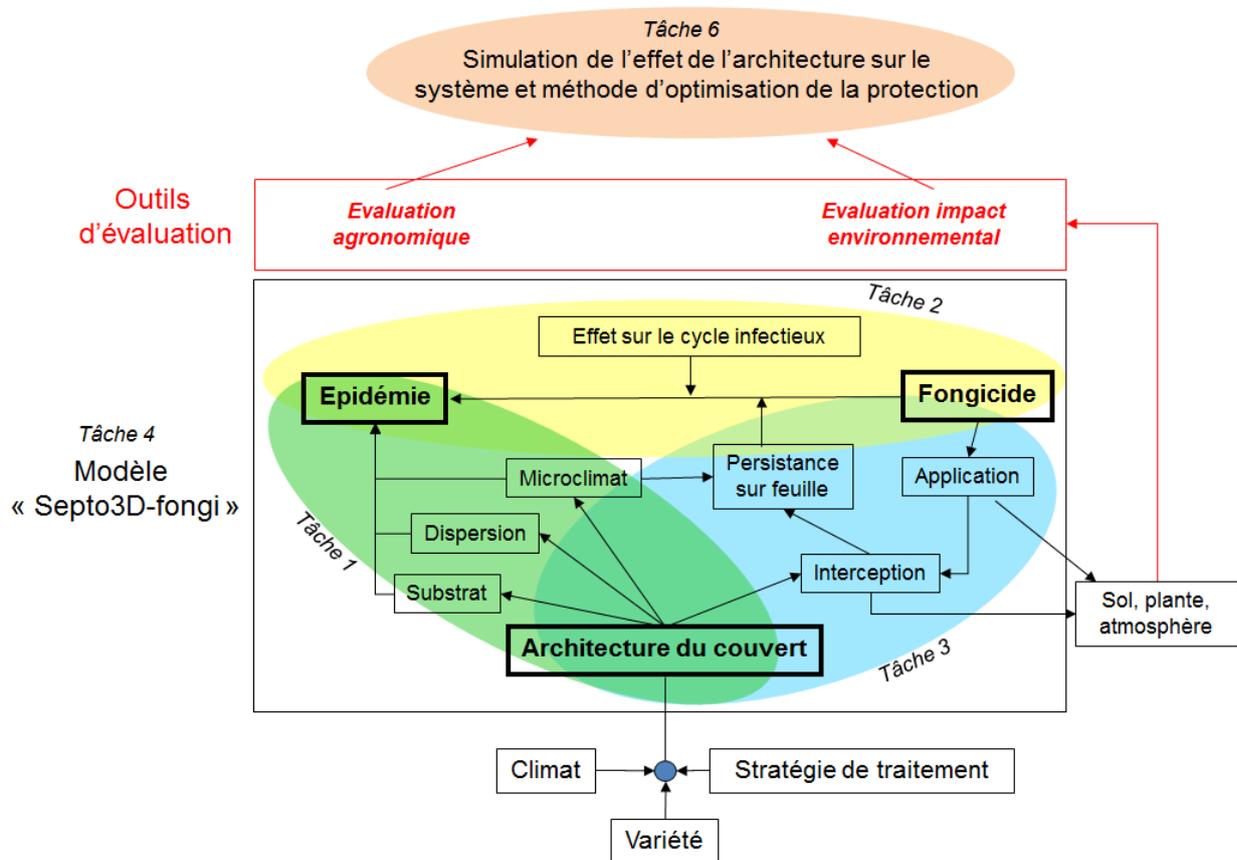
Pour répondre aux 5 objectifs du projet présentés ci-dessus, le projet a été organisé autour de 7 tâches (les tâches 1, 2 et 3 correspondent à l'axe 1) (figure 1) :

- La tâche 0 décrit le management et l'animation du projet, avec des propositions pour gérer la pluridisciplinarité qui est centrale pour la réussite du projet
- La tâche 1 traite des interactions entre l'architecture du couvert et les épidémies qui s'y développent. Elle permet de simuler développements du couvert et épidémies associées.
- La tâche 2 s'intéresse à l'effet des fongicides sur les cycles infectieux. Elle permet de simuler l'effet des fongicides sur les lésions une fois que le produit a atteint la feuille.
- La tâche 3 caractérise les interactions entre l'architecture du couvert et l'application des fongicides. Elle permet d'estimer l'interception du pesticide par les plantes et sa persistance

sur les feuilles. Cela détermine la dispersion des produits dans l'environnement, base de l'élaboration des « bilans environnementaux » (tâche 4).

- La tâche 4 construit et teste une boîte à outils logicielle pour la simulation et l'évaluation de stratégie de traitement fongicide. Pour cela, elle couple les modèles des 3 premières tâches et y associe des critères environnementaux d'évaluation des stratégies.
- La tâche 5 teste au champ des stratégies de traitement pour des architectures variées. Les données obtenues permettent de valider les modèles développés dans la tâche 4.
- La tâche 6 identifie par simulation les effets de l'architecture sur le système. Elle propose une méthode d'optimisation de la protection. Elle utilise les modèles développés dans la tâche 4.

Une des caractéristiques du projet ECHAP est **le lien fort qui existe entre les tâches** : les expérimentations développées dans les tâches 1, 2 et 3 sont nécessaires pour la réalisation des modèles assemblés dans la tâche 4. La tâche 6 nécessite la finalisation des tâches 4 et 5. Enfin, la tâche 5 est une tâche qui mobilise de nombreux partenaires sur la même expérimentation et donc constitue un fort ancrage dans le projet.



**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).

### II3. Sites et objets d'étude

Le pathosystème blé-septoriose a été retenu, à titre démonstratif pour plusieurs raisons :

- La septoriose est en France, et en Europe de l'Ouest, la maladie majeure du complexe foliaire des maladies du blé.

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

- Le contrôle de la septoriose est essentiellement basé sur la lutte chimique. Selon les années, 1 à 3 traitements fongicides sont appliqués pour maîtriser la maladie.
- Les épidémies de septoriose sont influencées par l'architecture des couverts.
- Le modèle Septo3D, couplant développement 3D des couverts et développement épidémique, développé sur ce pathosystème, était opérationnel au début du projet.

Matériel végétal et variation d'architecture. Des lignées de blé quasi-isogéniques variant pour les allèles *Rht* de réduction de hauteur ont été utilisées pour la première année d'expérimentation du projet. Elles sont issues de la collection du John Innes Center (UK). Le fond génétique utilisé est celui du cultivar britannique Mercia, un cultivar non semi-nain *Rht* (*Rht-D1a*). Les lignées choisies permettent un contraste intéressant avec le cultivar de référence Soissons (*Rht1*) : une étant plus grande (*rht*) et l'autre plus courte (*Rht3*). Pour la deuxième année l'objectif était d'utiliser des lignées quasi-isogéniques, en cours de construction au début du projet, variant pour les allèles *Tin* de nombre de talles. Le fond génétique choisi était celui du cultivar français Appache, assez sensible à la septoriose. Dans les deux cas, les lignées sont développées par backcross pour fixer chaque allèle désiré dans le même fond génétique. Ceci assure, autant que possible, que les lignées obtenues varient pour l'architecture mais sont identiques pour les allèles de résistance. Un fort gel en saison 2 a tué précocement les blés des essais et on a utilisé la variété Trémie en saisons 2 et 3.

Le contexte environnemental et agronomique correspond à celui du grand bassin parisien, qui peut être considéré comme représentatif des systèmes de production céréaliers du Nord de l'Europe. Les expérimentations de terrain pour tester des stratégies de traitement associées à des architectures variées sont réalisées sur la station de Boigneville (ARVALIS institut du végétal). Le sol correspond à des limons profonds.

Définition des stratégies de traitements. Il y a classiquement 2 traitements fongicides contre la septoriose. Le premier traitement (T1) 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 (T2) a lieu à feuille drapeau étalée afin de la protéger ; cette feuille joue un rôle majeur dans le rendement et elle est donc protégée en priorité. Pour diminuer la quantité de fongicides de moitié, deux pistes ont été envisagées dans le projet : 1) diminuer la fréquence de traitement en supprimant T1 (dans ce cas, l'échappement créé par le couvert doit contribuer à diminuer la pression de maladie sur les feuilles 2, 3 et 4) ; ou 2) diminuer la dose des deux traitements par deux (l'échappement observé sur des plantes hautes (Lovell et al. 2002) permet de diminuer les niveaux de maladies sur les 3 dernières feuilles et donc devrait permettre de traiter moins la dernière feuille, cible du T2).

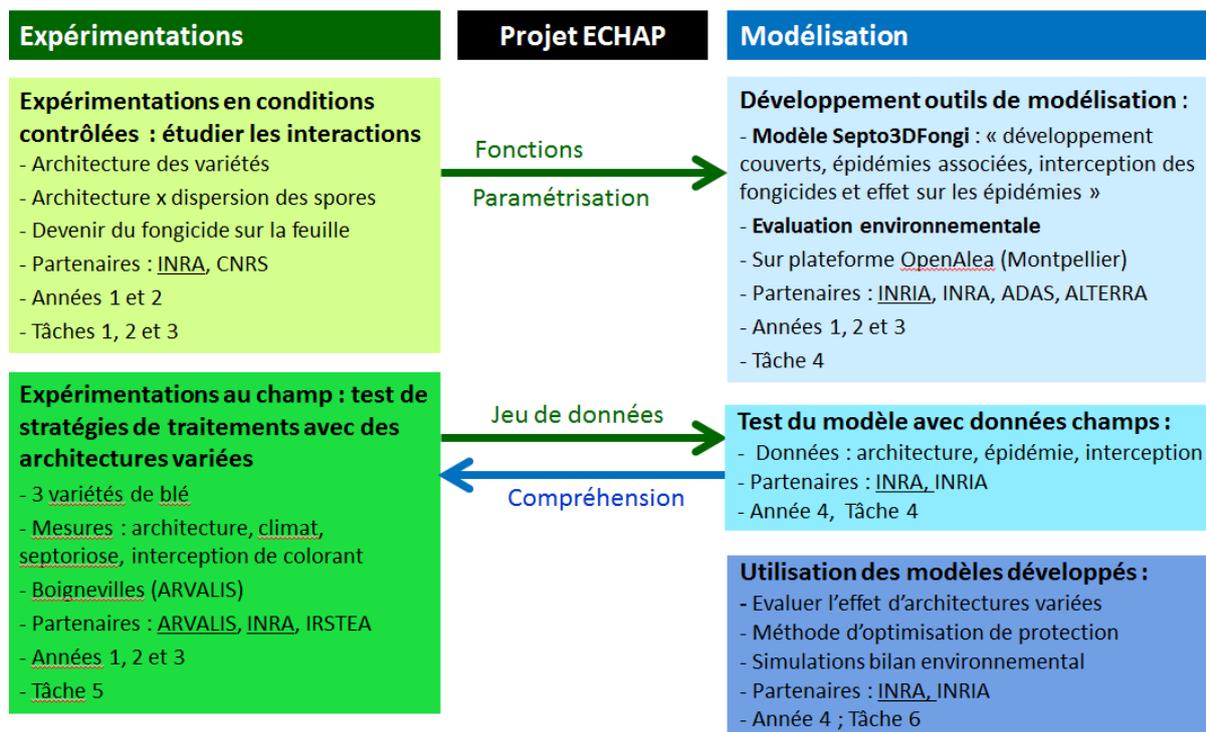
Choix des fongicides. Les traitements classiquement utilisés sont à base d'époxiconazole ou de prothioconazole, associé au prochloraze, chlorothalonil, boscalid ou des strobilurines. Dans une optique de généralisation des résultats et de test des hypothèses du projet, les fongicides retenus devaient être largement utilisés et représenter des modes d'action différents, afin que leur efficacité dépende de l'architecture des couverts et de la dynamique des épidémies. Les fongicides retenus pour le projet sont l'époxiconazole (triazole, préventif systémique) et le chlorothalonil (chloronitrile, curatif et de contact). L'époxiconazole, comme l'ensemble des triazoles, est un inhibiteur de la biosynthèse des stéroïdes (IBS). Il constitue la base de la stratégie anti-septoriose. La résistance à cette famille est largement installée, mais les génotypes majoritairement présents en 2009 induisent des niveaux de résistance faibles à moyens, qui assurent une efficacité résiduelle correcte. Des phénotypes fortement résistants aux triazoles sont cependant en émergence. Le chlorothalonil est un produit ancien encore largement utilisé, il est un représentant des fongicides à mode d'action « multisites » (possédant plusieurs cibles cellulaires) - ce qui les rend peu sujets au développement de résistances. Ces fongicides multisites présentent l'inconvénient d'être utilisés à fortes doses et sont généralement plus (éco)toxiques que les produits unisites plus récents.

## II4. Méthodologie

Le projet s'appuie sur des travaux de modélisation et d'expérimentations (figure 2).

Les expérimentations menées ont été de deux types (figure 2) : (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 (expérimentations ciblées de tâches 1, 2 et 3, figure 1) ; (2) au champ, elles ont permis de tester l'opérationnalité de l'approche sur le terrain avec des lignées de blé variées sur 3 saisons à Boigneville.

Un modèle, septo3Dfongi, simulant le développement des plantes et de leur architecture, l'interception du fongicide et les épidémies à l'échelle du couvert végétal a été mis au point. Pour le construire, différents modèles capables de traiter en partie l'un ou l'autre de ces aspects ont été couplés dans une plateforme unique (OpenAlea). Certains résultats expérimentaux du projet ont été utilisés pour la modélisation des mécanismes d'interaction (figure 2). Les expérimentations réalisées au champ sont utilisées pour tester les capacités de simulations du modèle (figure 2). L'évaluation des stratégies de traitement inclut une évaluation en termes de bilan environnemental qui est basée sur l'utilisation des modèles PRZM et de PEARL.



**Figure 2 :** Actions de modélisation (bleus) et expérimentations (verts) du projet ECHAP (2010-2014) et liens entre eux. Les expérimentations sont de 2 types : en conditions contrôlées pour l'étude des processus (vert clair) et au champ pour tester les idées du projet sur le terrain (vert foncé). Les actions de modélisation incluent le développement du modèle de simulation des stratégies Septo3Dfongi (bleu clair), son test avec des données (bleu moyen) et son utilisation pour mettre en lumière les effets de l'architecture sur le système (bleu foncé).

### III. Résultats

Les résultats du projet sont présentés par thèmes transversaux regroupant des actions menées dans différentes tâches du projet (figure 1) et qui correspondent aux 5 objectifs présentés en page 26 du rapport. Les principaux participants sont indiqués au début des paragraphes. Les liens entre les résultats de ces thèmes sont indiqués dans le document. Les thèmes présentés sont :

- III.1 Etude des interactions entre architecture des blés, septoriose et fongicide. Il s'agit de résultats issus d'expérimentations ciblées des tâches 1, 2 et 3.
- III.2 Test empirique de stratégies fongicides aux champs avec des architectures variées. Ce sont les résultats obtenus dans la tâche 5 de l'expérimentation à Boigneville.

- III.3 Développement d'un modèle simulant « développement du couvert – épidémie – interception et persistance du fongicide » et les critères d'évaluation des stratégies associés. Il s'agit de l'assemblage de modélisation réalisé dans la tâche 4.
- III.4 Test du modèle développé avec les données des expérimentations au champ de Boigneville. C'est la validation du modèle prévue dans la tâche 4 du projet.
- III.5 Exploration de l'effet de l'architecture, méthode d'optimisation de la protection et simulation de l'impact environnemental. Cela correspond à l'utilisation des modèles prévue dans la tâche 6.
- III.6 Estimation des impacts environnementaux associés aux stratégies de traitement

### III1. Etude des interactions « architecture x pathogènes x fongicide »

Lorsque nous avons écrit le projet, nous avons identifié 4 questions principales dont la connaissance manquante était un verrou pour l'analyse de notre question et le développement du modèle dans le projet. Des expérimentations ciblées ont été réalisées afin d'acquérir ces connaissances. Tout d'abord, il était nécessaire de caractériser l'architecture des blés utilisés dans le projet. En particulier nous avons étudié la dynamique de courbure des feuilles, trait d'architecture assez peu connu chez le blé mais dont nous avons fait l'hypothèse qu'il peut être 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. Un point clé qui manquait 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 ce rapport, nous présentons les principaux résultats obtenus sur ces 4 expérimentations ciblées.

#### III1a. Architecture des lignées de blé du projet

*INRA ECOSYS (Robert C., Dornbusch T., M. Abichou, B. Andrieu) et INRA LEPSE (Fournier C).*

Une expérimentation a été réalisée à l'unité Ecosys INRA en année 1 du projet afin de caractériser l'effet des gènes de nanisme sur l'architecture, et en particulier de décrire la dynamique de la courbure des feuilles et de comparer l'architecture des lignées du projet avec la variété Soisson qui est la variété de référence dans les modèles d'architecture 3D développés au laboratoire. Pour cela, les plantes de blé des différentes lignées (Mercia, et les lignées naines associées aux allèles *rht3*, *rht10*, *rht2*) et Soissons ont été semées dans des bacs en serre et au champ et des mesures régulières de l'architecture ont été réalisées (Figure 3).



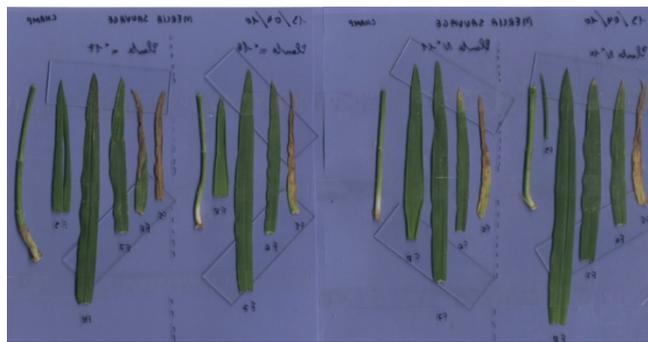
**Figure 3** : Lignées de blé semées en bacs de 1m<sup>2</sup> en serre, Cv. Mercia. Projet ECHAP 2010-2014.

Des mesures du rythme de développement des plantes, des dimensions des feuilles et des tiges, du tallage ainsi que des paramètres de géométrie des plantes et en particulier de la courbure des feuilles ont été réalisées. Les feuilles des plantes sont scannées afin d'estimer les surfaces, largeurs et longueurs des feuilles (Figure 4). Les mesures 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.

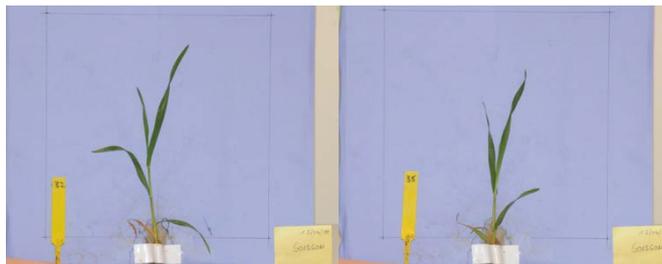
La courbure des feuilles est un paramètre important pour déterminer la distance entre les feuilles et donc la distance à parcourir pour les spores entre les feuilles infectées et les feuilles saines du haut du couvert (Lovell et al. 2004). De plus, c'est un paramètre qui joue fortement sur l'interception de la lumière par le peuplement (Espania et al. 1999) et on a donc fait l'hypothèse qu'elle peut également

jouer sur l'interception des fongicides par les feuilles. La courbure des feuilles est le résultat d'un processus complexe et dynamique qui implique la division et la croissance des cellules ainsi que leur rigidification. Sur le maïs, la courbure des feuilles est liée à sa position sur la tige (numéro de feuille) (Espania et al. 1998). Sur le blé, Ledent et al. (XXX) ont montré que la courbure de la feuille drapeau change avec le vieillissement de la feuille. Notre expérimentation a eu pour objectif de tester ces 2 hypothèses (effet du rang foliaire et de l'âge de la feuille) pour des feuilles de rosette et des feuilles après montaison pour 4 variétés de blé, dont les variétés naines du projet. Pour caractériser la courbure des feuilles des différentes lignées, les maître-brins ont été photographiés régulièrement et la courbure obtenue par analyse d'image (Figure 5). Les analyses révèlent que les courbures de feuilles sont fortement liées à leur âge. Les feuilles émergent verticalement puis elles s'affaissent alors qu'elles vieillissent. Cet affaissement est présent pour les différentes lignées de blé étudiées dans l'expérimentation avec des différences peu marquées entre les lignées. On observe par contre une variation de la dynamique d'affaissement des feuilles entre feuilles du haut (insérées sur la partie allongée de la tige) et feuilles du bas (insérée en rosette à la base de la tige). Les feuilles de rosette s'affaissent plus rapidement et plus amplement. L'expérimentation confirme donc l'effet du vieillissement de la feuille sur la courbure (Ledent et al. XX) ainsi qu'un effet du rang foliaire (Espania et al. 1998), mais qui s'exprime plutôt entre les feuilles de la rosette et les feuilles après montaison sur le blé seulement.

Pour prendre en compte ces effets dynamiques, le modèle de gestion de la géométrie des feuilles a été complété dans le simulateur. Cela a nécessité de définir un nouveau modèle de forme de feuilles qui permet de simuler ces dynamiques (Fournier et Pradal, 2012).



**Figure 4 :** Scan pour estimer par analyse d'image les dimensions des feuilles. Projet ECHAP 2010-14



**Figure 5 :** Caractérisation de la courbure des feuilles. Les maître-brins sont photographiés régulièrement et les courbures des feuilles sont obtenues par analyse d'image. Projet ECHAP.

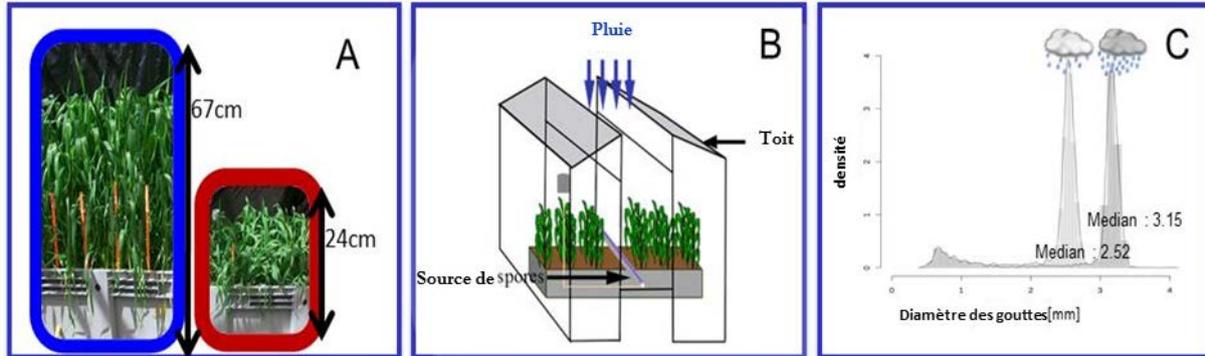
Ces données fines d'architecture ont été utilisées dans la suite du projet pour simuler les architectures des blés dans le modèle de plante en 3D (axe 3) qui est utilisé pour simuler des stratégies de traitement fongicide. Les résultats sur la dynamique de courbure des feuilles sont en cours de publication.

### **III1b. Dispersion de spores dans des architectures contrastées de blé**

*INRA ECOSYS* (Girardin G., Saint Jean S., Robert C.)

La dispersion par éclaboussement de *Mycosphaerella graminicola*, agent de la septoriose du blé, dépend à la fois de l'architecture du couvert végétal (Robert et al., 2008) et des caractéristiques de la pluie (Huber et al., 2006). Une expérimentation a été réalisée en serre et en conditions contrôlées au

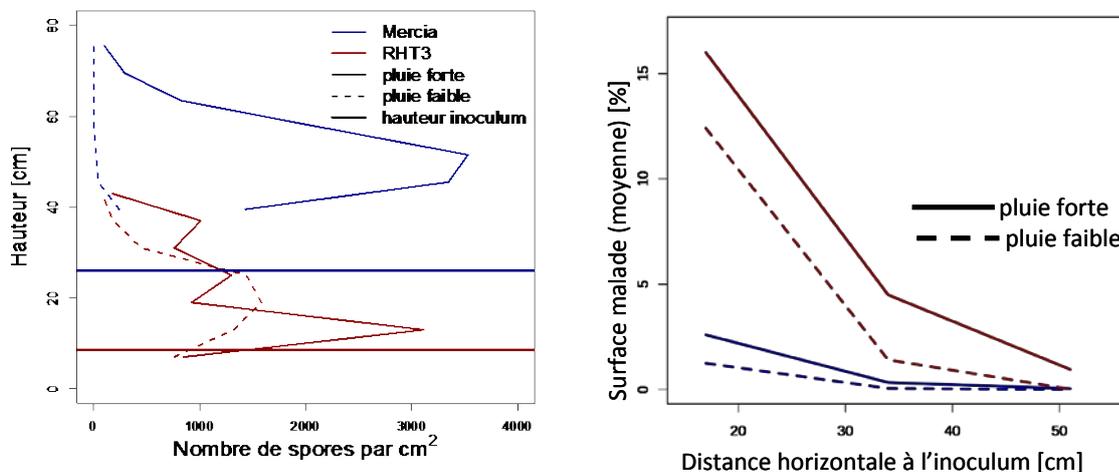
laboratoire EcoSys de l'INRA de Grignon en année 1 du projet afin d'obtenir des données fines de dispersion de spores dans des architectures contrastées (Figure 6) pour appréhender et décoller les mécanismes en jeu (Calonnec et al., 2013) dans la progression de maladie dispersée par éclaboussement. Pour assurer la cohérence avec les expérimentations réalisées au champ à Boigneville dans le projet, les lignées de blé utilisées sont Mercia sauvage et naines avec l'allèle rht3.



**Figure 6 :** Protocole utilisé pour quantifier l'effet de l'architecture des couverts sur la dispersion de spores : (A) les deux lignées de blé utilisées, (B) utilisation d'un simulateur de pluie artificielle pour la dispersion des spores depuis une source localisée dans le bas du couvert et (C) caractérisation en terme de diamètre des gouttes des 2 types de pluies utilisés dans l'expérimentation. Projet ECHAP.

Les architectures des deux lignées ont été caractérisées en termes de hauteur de tige et de dimensions de feuilles. La dispersion des spores et des lésions issues d'une source de spores localisées au centre du couvert pour deux types de pluies a été mesurée. Pour cela les symptômes de maladie sur les trois étages foliaires supérieurs de plantes situées à des distances variées de la source ont été notés. Le flux de spores dans les différentes architectures, à plusieurs hauteurs (ou étage foliaires) et pour les deux types de pluie ont également été mesuré à partir de pièges disposés entre les rangs de plantes blé.

Les notations de surface malade dans les différentes architectures montrent un effet marqué de l'architecture sur la dispersion des spores dans le couvert (Figure 7). Dans les blés nains on observe des niveaux de maladie nettement plus élevés sur les trois étages foliaires du haut du couvert que sur les blés hauts. La lignée haute présente des niveaux de maladie faible indiquant une faible interception de spores provenant de la source. La pluie de forte intensité n'entraîne plus de maladie que sur les blés nains. Les résultats obtenus par ce type de dispositif expérimental sont importants pour dissocier les différents mécanismes afin de valider les approches de modélisations et apportent des éléments de stratégies de gestion des maladies dispersées par éclaboussement basées sur le choix de l'architecture des variétés.

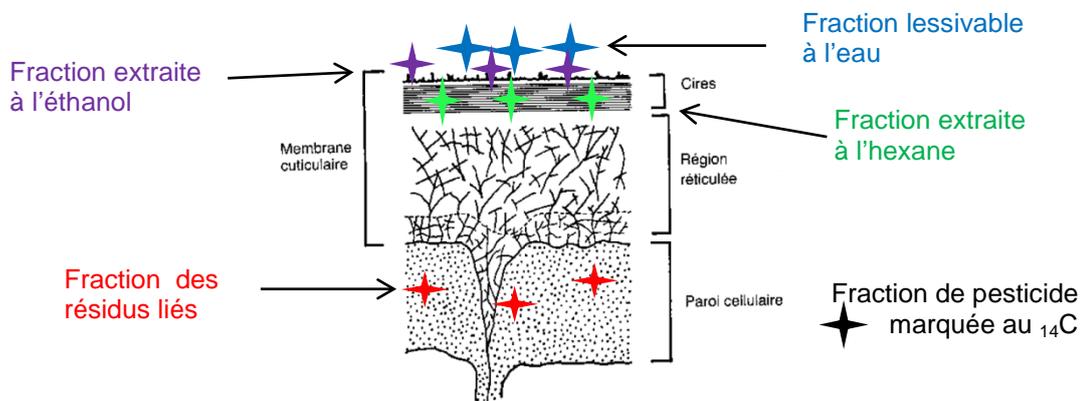


**Figure 7:** À gauche nombre de spores par  $\text{cm}^2$  collectés dans le couvert végétal à différentes hauteurs à 17 cm de la source d'inoculum (après un rang de plantes). À droite % Surface malade des feuilles en fonction de la distance à la source d'inoculum (x) pour les deux lignées de blé Mercia (bleu) et nains (rouge) pour deux types de pluies : une pluie d'intensité forte (traits continus) et faible (traits pointillés). Résultats issus d'une expérimentation où deux types de pluie ont été utilisés pour disperser des spores à partir d'une source de spores localisée dans le couvert. La surface malade correspond aux lésions issues de ces pluies sur les plantes. Projet ECHAP 2010-2014.

### III1c. Devenir du fongicide après application sur la feuille

INRA ECOSYS (Lichiheb N., Bedos C., Benoit P., Barriuso E.) ; CNRS Clermont-Ferrand (Ter Hall A., Richard C.)

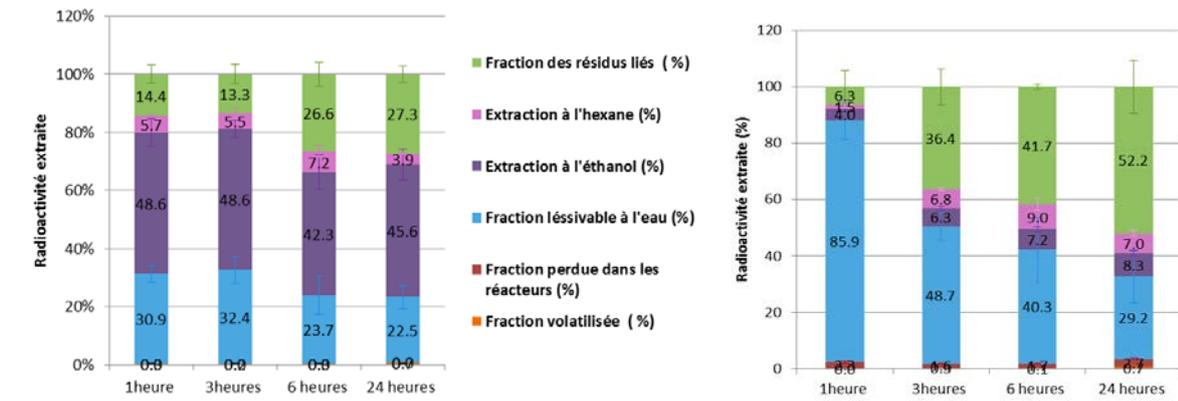
Pour caractériser la persistance des fongicides sur la feuille après application et leur pénétration, des expérimentations en laboratoire ont été réalisées avec des fongicides radiomarqués au  $^{14}\text{C}$ , appliqués soit purs soit avec la formulation. La cinétique de pénétration et de volatilisation de trois matières actives utilisées pour contrôler la septoriose (époxyconazole, fenpropidine et chlorothalonil) a été étudiée ainsi que leur comportement sous forme de produits commerciaux (pour l'époxyconazole, l'Opus New (83  $\text{g L}^{-1}$  époxiconazole; BASF Agro SAS, France; pour la fenpropidine, le Gardian (750  $\text{g L}^{-1}$  fenpropidine; Syngenta, France) ; et pour le chlorothalonil, Banko 500, 500  $\text{g L}^{-1}$  chlorothalonil; Arysta Lifescience, France). Pour se faire, des feuilles de blé (variété Premium) sur lesquelles la solution pesticide a été appliquée à l'aide d'une micropipette ont été introduites dans 3 réacteurs en parallèle (constituant ainsi 3 répétitions), réacteurs soumis à un écoulement d'air constant et contrôlé. Le piégeage des molécules volatilisées dans des adsorbants adaptés (mousse de polyuréthane) et un protocole d'extraction des feuilles spécifique en 4 étapes (lessivage à l'eau, à l'éthanol, à l'hexane pour finir par une combustion) (Figure 8) ont permis de 1) quantifier les pertes par volatilisation et 2) caractériser la localisation du produit dans les différents tissus de la feuille et cela après différents délais post-application (1h, 3h, 6h et 24h). Il est important de préciser que ces expérimentations ont été effectuées à l'obscurité afin de supprimer le processus de photodégradation.



**Figure 8 :** Représentation schématique des différentes fractions extraites sur et dans la feuille après application des produits (Lichiheb, 2014, projet ECHAP)

Les résultats obtenus (figure 9) montrent que pour l'époxyconazole, la pénétration dans les feuilles est favorisée quand il est appliqué formulé (produit commercial) par rapport au produit pur. Cette observation est en accord avec plusieurs études qui ont confirmé que la formulation assure un meilleur étalement de la solution à la surface des feuilles et favorise donc sa pénétration (Leistra, 2005). L'augmentation de la pénétration s'accompagne d'une diminution de la fraction lessivable à l'eau. Les pertes par volatilisation sont par ailleurs faibles, en lien avec sa faible pression de vapeur saturante. En ce qui concerne le chlorothalonil formulé (la matière active pure n'a pas pu être étudiée en lien avec une mauvaise solubilité dans la solution d'application), 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 et par conséquent une fraction du produit disponible à la volatilisation plus importante. Quant à la fenpropidine formulé, son taux de volatilisation juste après l'application s'est trouvé réduit par rapport à celui de la matière active pure, en lien avec un taux de pénétration fort dès l'application en présence de formulation. Ce fort effet de la formulation est en accord avec le mode d'action systémique de la fenpropidine.

Outre la faisabilité méthodologique de ces mesures, 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. Ils permettent par ailleurs d'expliquer des observations au champ (Bedos et al., 2010). Ces travaux n'ont pas porté sur la même variété de blé que celles étudiées dans ce projet. En revanche, les feuilles étaient prélevées à un stade de développement en adéquation avec les dates de traitements des fongicides ici sélectionnés. Nous pouvons considérer que le comportement des molécules appliquées sur du blé est globalement bien appréhendé par ces expérimentations.



**Figure 9:** Bilans de masse de dissipation de l'époxyconazole appliqué à la surface des feuilles (à gauche, produit pur, à droite formulé ; (Lichiheb, 2014, projet ECHAP)

Une des sorties importantes de ce travail porte sur le calcul de constantes de pénétration foliaire des fongicides étudiés. Les résultats expérimentaux montrent que la pénétration augmente progressivement en fonction du temps avec un effet fort de la formulation, notamment pour les produits ayant un mode d'action systémique comme l'époxyconazole dont le coefficient de pénétration est multiplié par 3 en présence de formulation (pour atteindre  $0.47j^{-1}$ ). Le coefficient de pénétration foliaire calculé pour le chlorothalonil, relativement faible à  $0.23j^{-1}$  pour le produit formulé est quelque peu supérieur à celui estimé par Leistra et Van den Berg (2007) pour des feuilles de pomme de terre ( $0.14j^{-1}$ ). Cette différence peut s'expliquer par les différences morphologiques des feuilles de blé et de pomme de terre, ces dernières étant couvertes de poils qui diminuent la mouillabilité des feuilles et donc la pénétration dans les feuilles (Xu et al., 2011). Ces résultats sont en accord avec la classification proposée par Leistra (2005) pour les produits formulés: la pénétration de l'époxyconazole se produit à une vitesse modérée et celle du chlorothalonil à un taux plus lent, en accord avec leur mode d'action respectif.

Enfin, ces travaux ont fourni des estimations quantitatives des différents paramètres empiriques nécessaires à la simulation du devenir des fongicides sur les feuilles dans le modèle développé dans le projet (partie III.3 du rapport) et à la description des processus de pénétration et de volatilisation par les modèles de bilans environnementaux utilisés dans ce projet (partie III.6 du rapport).

La photodégradation des pesticides sur les feuilles n'étant pas évaluée dans ces systèmes expérimentaux, des expérimentations complémentaires ont été menées dans le cadre de la thèse de N. Lichiheb (2014) au sein du laboratoire de Clermont-Ferrand à l'aide du simulateur solaire Suntest CPS (Atlas). Le protocole utilisé est celui développé par A. ter Halle, basé sur l'utilisation de films de cires artificielles pour mimer la surface des feuilles. Il s'agit de supports abiotiques représentatifs de la fine couche de cire épicuticulaire présente sur la cuticule des plantes et sur laquelle s'adsorbent les pesticides. Ces travaux ont donné lieu à des analyses intéressantes portant sur l'effet de la formulation, de la concentration de la solution ainsi que du mode d'application du fongicide sur la feuille (gouttelettes ou film fin). Ces expérimentations montrent que la photodégradation est peu significative pour les conditions et les composés choisis. Les résultats obtenus ont également permis de simuler le devenir des produits interceptés par les feuilles dans le modèle, en particulier en paramétrant la photodégradation des fongicides sur la surface de la feuille (partie III.3 du rapport).

## III.2. Test de stratégies de traitement fongicides avec des architectures variées

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

*ARVALIS Institut du végétal Boignevilles (Perriot B., Gouache D., Poidevin S., Da Costa J., Danthony A., Gaudillat N.)*

*INRA ECOSYS (Abichou M, Jean Jacques J, Bidon M, Durand B, Saint Jean S, Bedos C., Andrieu B., Robert C.)*  
*IRSTEA (Cotteux E., Bonicelli B.)*

Trois années d'expérimentations ont été réalisées à la station de Boigneville (station expérimentale Arvalis - Institut du végétal). L'objectif est de tester différentes stratégies de traitement fongicides sur des architectures variées. L'essai vise également à étudier la technique de traitement à bas volume. Enfin, un objectif supplémentaire est d'obtenir un jeu de données pour valider le modèle développé dans le projet (III.3 du rapport).

Un ensemble varié de mesures a été réalisé sur l'essai, dont les principales sont :

- Mesures d'architecture des plantes et caractérisation du peuplement végétal
- Mesures de sévérité de septoriose sur les parcelles traitées et non-traitées
- Caractérisation des souches de *M. graminicola* dans les différents traitements
- Mesures de la quantité d'interception du colorant tartrazine par les feuilles du haut du couvert
- Mesures météorologiques et d'interception lumineuse dans le couvert

**Tableau I. Les différentes modalités de l'essai ECHAP.**

Le produit utilisé pour le traitement est de l'OPUS® (époxyconazole) à 1L.ha<sup>-1</sup>. Le traitement T1 a été effectué au stade deux nœuds (13/04/2011) et T2 au stade "dernière feuille ligulée" (3/05/2011).

Modalité	Variable	Date	Dose	Volume hectare <sup>a</sup>
1	Référence	T1 + T2	N	200
2	Témoin non traité			
3	Traitement	T1	N/2	200
4	Traitement	T2	N/2	200
5	Volume	T1 + T2	N/2	200
6	Volume	T1 + T2	N/2	150
7	Volume	T1 + T2	N/2	80
8	Volume	T1 + T2	N/2	40

<sup>a</sup> Le volume hectare est exprimé en L.ha<sup>-1</sup>

Huit modalités de traitement fongicides sont réalisées sur les essais. Les modalités mises en œuvre intègrent plusieurs objectifs : besoin d'une conduite de référence non-traitée, d'une conduite de référence traitée, souhait d'intégrer des volumes différents et de caractériser l'effet de différent nombre de traitements (Tableau 1). Le dispositif est conduit avec 3 répétitions, et des 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 (Figure 10).



**Figure 10** : A : localisation des parcelles d'essai sur le site de Boigneville, B : quad utilisé pour traiter à différents volumes les parcelles de blé de l'essai, C : mat météorologique. Projet ECHAP 2010-14.

L'application de produit à bas volume est délicate dans la mesure où la probabilité d'obtenir des petites gouttes est plus importante ce qui augmente le risque de dérive. Afin de limiter les pertes, le choix a été celui d'utiliser des buses basse pression à 110° permettant une faible hauteur de rampe à 50 cm de la cible.

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

Le volume de bouillie (en l/ha) se calcule, à un coefficient près, comme le produit entre le débit de bouillie à la rampe (l/min) et l'inverse de la vitesse (km/h).

$$\text{volume épandu} = 600 \times \frac{\text{Débit de bouillie à la rampe}}{\text{largeur de travail} \times \text{vitesse}}$$

Ainsi, plus le volume est faible plus la vitesse est importante ce qui exige un matériel particulier. La rampe de pulvérisation à air comprimé a donc été montée sur un quad afin d'atteindre les vitesses requises lors d'une application en bas volume. Cette dernière, placée à droite du quad, mesure 3 m et comporte six buses espacées de 50 cm.

Le débit se détermine par le calibre de la buse et sa pression. Nous avons fixé la pression à 1.5 bars quel que soit le volume afin de limiter les biais d'expérimentation. Le calibre des buses est choisi en fonction du volume souhaité et la vitesse d'avancement du quad est finalement déduite. Le tableau 2 résume le matériel utilisé et la vitesse du quad pour les saisons 2 et 3. Le matériel utilisé en saison 1 était le même à l'exception de la dernière buse qui était de couleur bleue et utilisée à la vitesse de 5.1 km/h (pour la modalité à 200 l/ha).

Volume (l/ha)	Débit buse (l/min)	Buse	Couleur	Pression (bars)	Vitesse (km/h)
<b>40</b>	0.42	XR 110 015	Verte	1.5	12.5
<b>80</b>	0.36	XR 110 020	Jaune	1.5	8.4
<b>150</b>	0.83	XR 110 030	Bleu	1.5	6.7
<b>200</b>	1.12	XR 110 040	Rouge	1.5	6.7

**Tableau 2** : Matériel de pulvérisation et conditions d'application (saisons 2 et 3 de l'essai Boigneville)

En saison 1 (2010-2011), 2 lignées de blé ont été implantées : Mercia (variété anglaise) et une lignée isogénique 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 GDEC INRA de Clermont Ferrand). Mais, un gel tardif et fort a détruit l'essai en hiver. On s'est alors reporté sur des parcelles avec la variété Trémie. Afin d'obtenir un jeu de données cohérent, la variété Trémie a été également utilisée en saison 3 (2012-2013).

### III2a. Développement des architectures des blés

Les mesures d'architecture ont eu pour objectifs de caractériser et de comparer les architectures des 3 saisons d'expérimentations, et en particulier au moment des traitements.

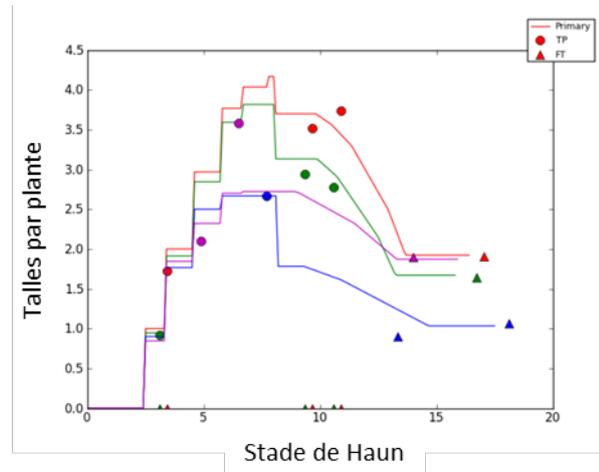
**Densité de plantes.** Les densités nominales de semis pour les essais au champ étaient de 220 à 300 plantes par m<sup>2</sup>, avec un inter-rang de l'ordre de 15cm (Tableau 3). Les densités de plantes après levée sont de l'ordre de 200 plantes par m<sup>2</sup> pour les blés Mercia et Rht3, et 1.2 à 1.4 fois plus élevées pour les blés de la variété Trémie (Tableau 3). Pour Trémie, ces densités de plantes se sont maintenues jusqu'à la récolte, alors que pour les blés Mercia et Rht3, on note une perte importante de plantes de 25% autour du stade 10, lié à une attaque forte de mouches grises.

	Mercia 2011	Rht3 2011	Trémie 2012	Trémie 2013
Date semis	15 oct 2010	15 oct 2010	21 oct 2011	29 oct 2012
Densité de semis	220	220	280	300
Inter-rang (cm)	15	15	14.3	15
Densité levée	203	211	281	251

**Tableau 3** : Caractéristiques des semis des parcelles pour les essais à Boigneville de l'essai ECHAP.

**Tallage.** L'émission de talles primaires a été 1.5 fois plus importante chez les lignées Mercia et Rht3 que chez la variété Trémie, principalement en raison de plus hautes fréquences d'émission des talles 4 et 5 (Figure 11). Au maximum du tallage (stade 7 environ), on trouve ainsi en moyenne 4 talles primaires par plantes sur les blés Mercia et Rht3, et 2.5 talles primaires par plantes sur les blés Trémie. Ceci aboutit, en termes de densité d'axes par m<sup>2</sup>, à une compensation quasi parfaite des différences de densité de plantes levées (Tableau 4). Cette homogénéité de densité d'axes par m<sup>2</sup> entre les lignées disparaît rapidement après le stade 7, non seulement en raison de différences entre variétés dans la dynamique de régression des talles, mais aussi en raison des dégâts liés à la mouche

pour les blés Mercia et Rht3 et d'un épisode de gel qui a conduit à la mort de talles pour les blés Trémie en saison 2. Au final, les densités d'axes en période de régression et les densités d'épis à la récolte varient presque du simple au double entre variétés et entre années (Tableau 4).



**Figure 11** : Dynamique d'évolution du nombre de talles primaire par plantes en fonction du stade de développement (Stades de Haun) : nombre de talles primaires. Les points indiquent les mesures, les lignes indiquent les ajustements utilisés dans le modèle de plante. Projet ECHAP 2010-2014

	Mercia 2011	Rht3 2011	Trémie 2012	Trémie 2013
Densité de plante (maxT)	203	211	281	251
Axes l <sup>aire</sup> / plante (maxT)	5	4.8	3.7	3.7
Densité d'axe l <sup>aire</sup> (maxT)	1015	1012	1039	928
Densité d'axe l <sup>aire</sup> (maxT + D)	719	598	780	928
Densité de plante (récolte)	153	146	281	251
Epis / plante (récolte)	2.9	2.6	1.9	2.9
Densité d'épis (récolte)	444	384	530	728

**Tableau 4** : Caractérisation des populations d'axes primaires au maximum du tallage (maxT), peu après le maximum de tallage en tenant compte du gel et des dégâts liés à la mouche (maxT + D), et à la récolte pour les différentes lignées de blé et les saisons de l'essai

**Dynamique d'émission des feuilles et du nombre de feuilles vertes.** L'émission des feuilles s'est faite au rythme moyen d'une feuille émise tous les 108°C.jour pour toutes les années et toutes les variétés. Le nombre total de feuilles émises a varié entre variétés et entre années (Tableau 5), avec des modalités de nombre de feuilles majoritaires comprises entre 11 (Rht3 et Trémie 2013) et 13 feuilles (Trémie 2012).

Nombre de feuilles	Mercia 2011	Rht3 2011	Trémie 2012	Trémie 2013
10		0.04		
11	0.37	0.68		0.71
12	0.60	0.28	0.33	0.29
13	0.03		0.67	
<b>Nombre moyen</b>	<b>11.66</b>	<b>11.24</b>	<b>12.67</b>	<b>11.29</b>

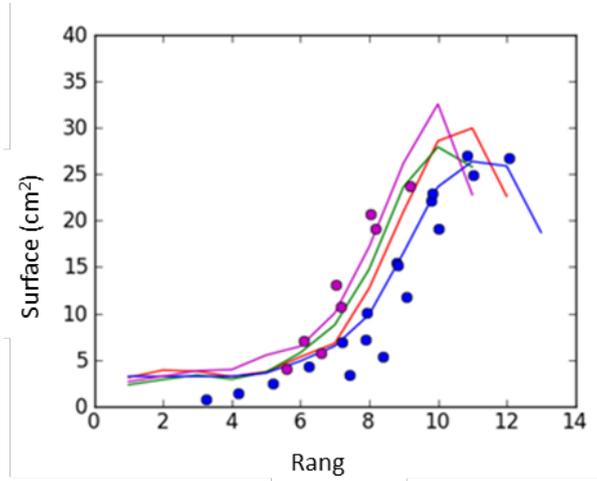
**Tableau 5** : Fréquences de présence des maitres brins ayant émis 10, 11, 12 ou 13 feuilles (normal) et nombre de feuille moyen (italique) pour les différentes variétés et années. En gras figure la plus haute fréquence.

La dynamique d'évolution du nombre de feuilles vertes en fonction du stade de développement est par contre restée similaire pour 3 situations sur 4. Seule la variété Trémie, en 2013, présente, à partir de la montaison, un nombre de feuilles vertes plus faible.

**Dimension des organes.** Les surfaces individuelles de feuilles les plus grandes et les plus petites ont été observées sur la variété Trémie, respectivement en saison 3 et 2 (20% de différence). Les feuilles des blés Mercia et Rht3 se situent à un niveau intermédiaire entre les 2, et présentent assez peu de différences entre eux (Figure 12). Pour les blés Trémie, les différences entre les 2 années s'expliquent

à part égale en termes de variation de longueur et de largeur. Les feuilles des blés Mercia présentent un profil de longueur similaire à celles de Trémie en saison 3, mais avec des largeurs de feuilles similaires à celles Trémie en saison 2. Les feuilles de Rht3 sont les plus larges, mais aussi les plus courtes.

Les différences de hauteurs de plantes ont été très contrastées, variant de 45 à 80 cm. L'étendue de cette gamme s'explique par le génotype portant la mutation Rht3, qui a eu pour effet de réduire la hauteur de plante de 50%.



**Figure 12 :** Surfaces des feuilles des 3 lignées et 2 année de l'expérimentation à Boigneville. Les points représentent les mesures et les lignes les estimations utilisées dans le modèle. Projet ECHAP.

**Courbure des feuilles et port des plantes.** Le port des plantes semble relativement proche pour les blés des variétés Trémie et Mercia. Mais on note un port très différent des blés Rht3 au moment du maximum de tallage (Figure 13). Les blés Rht3 présentent des tiges plus inclinées que ceux de Mercia et Trémie, ce qui leur confère un plus grand pouvoir couvrant dans l'inter-rang. Cet étalement pourrait être lié aux tailles limitées des tiges.

Des photos de maître-brins ont été prises pour les différentes lignées du projet lors des expérimentations, mais leur analyse n'est pas encore terminée. Ces analyses permettront d'affiner la comparaison des courbures des feuilles entre les lignées.



**Figure 13 :** Photos d'une botte de plantes au stade plein tallage pour les blés Mercia (gauche) et Rht3 (droite) (saison 1 du projet ECHAP, Boigneville). Projet ECHAP 2010-2014.

**Bilan sur l'architecture des couverts de blé.** Dans une première phase, du semis au stade plein tallage (~stade HS 7) les couverts des différentes variétés de blés se sont développés dans le sens d'un rattrapage quasi parfait des hétérogénéités initiales de densité d'axe par mètre carré. Durant cette période, le rythme d'émission des feuilles et le nombre de feuilles vertes présentes sur les tiges est aussi resté semblable entre variétés. A la fin de cette période, les mesures de LAI reflètent majoritairement les différences de dimensions individuelles de feuille (Trémie 13 > Mercia et Rht3 >

Trémie 12, Tableau 6). Le port particulier de Rht3 et l'effet de saturation du taux de couverture avec le LAI explique que le taux de couverture à ce stade soit assez différent entre variétés (Rht3 >> Mercia et Trémie 2013 >> Trémie 2012).

Entre le stade HS 7 et le stade HS 15 des différences se créent entre variétés et entre années du point de vue de la densité d'axe (Trémie 13 >> Trémie 12 > Mercia > Rht3), avec une influence importante des incidents de culture (gel en 2012 et attaque de mouches en 2011). Celles-ci se superposent alors aux différences de dimensions. Le nombre de feuilles vertes par plante reste par contre constant entre variétés, sauf pour Trémie en 2013. Au final, les indicateurs mesurés au niveau du couvert indiquent une homogénéisation du taux de couverture au stade 15, et une différenciation des LAI reflétant principalement les différences de densité d'axes (Tableau 6).

	Mercia 20011	Rht3 2011	Trémie 2012	Trémie 2013
LAI vert au stade 9	3.2	3.3	2.7	4.7
Taux de couverture stade 9 (%)	65	80	40	67
LAI vert stade 15	4.0	3.8	4.5	n.a.
Taux de couverture stade 15 (%)	60	60	55	55

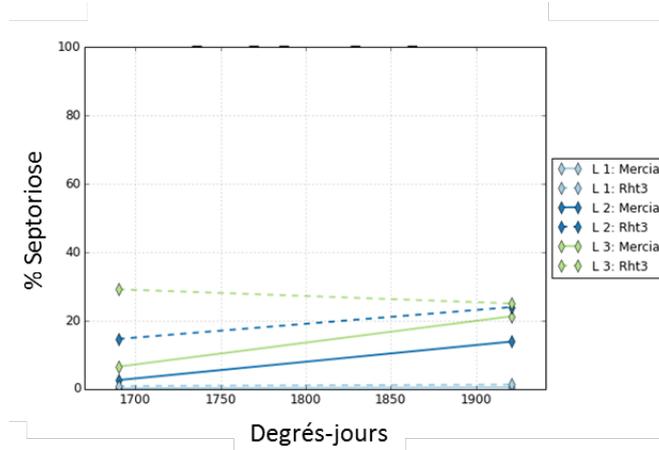
**Tableau 6 :** Estimation, par interpolation des mesures, du LAI vert et du taux de couverture à différents stades pour les 3 saisons de l'essai à Boigneville.

### III2b. Développement des épidémies

La sévérité de septoriose a été notée en % de nécroses sur les feuilles. Les suivis sont réalisés sur des plantes baguées afin de pouvoir suivre la maladie sur les différentes feuilles. Les notations sont faites deux fois en année 1, mais les suivis sont faits de façon hebdomadaire en saisons 2 et 3 à partir du mois de mars. Les blés notés de façon hebdomadaire sont les blés non traités et les blés « de référence » qui ont été traités 2 fois.

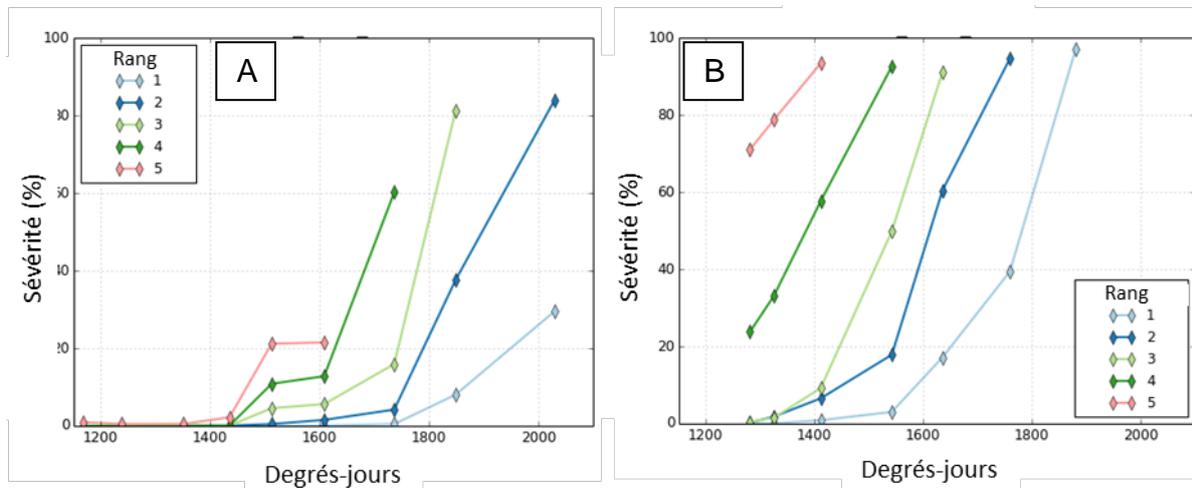
**Saison 1 (2009-2010).** La septoriose a été mesurée sur les blés Mercia et Rht3 de l'essai. Une notation faite en hiver sur les feuilles de rosette (19 janvier), montre qu'il y a alors peu de lésions sporulantes les feuilles. Ensuite 2 notations ont été faites, au stade floraison (25-26 mai) et 10 jours plus tard (8 juin). Pour chaque date, les 4 feuilles supérieures de 90 maître-brins ont été observées.

Les notations montrent que la septoriose a un développement assez limité sur l'ensemble des feuilles pour les 2 lignées de blé (Figure 14). En particulier la feuille drapeau ne présente pratiquement pas de lésions.. La sévérité de septoriose est plus forte sur la lignée Rht3 pour les feuilles 2 et 3 avec une sévérité de l'ordre de 2% et 5% sur Mercia contre 18% et 30% sur Rht3 pour les feuilles 2 et 3 respectivement. Ainsi malgré un climat plutôt défavorable au développement des épidémies, la lignée naine présente plus de maladie ce qui montre un effet marqué de l'architecture des blés sur le développement de la septoriose.



**Figure 14 :** % de septoriose dans les parties vertes des feuilles 1 (drapeau, bleu clair), 2 (bleu foncé) et 3 (vert) pour les blés Mercia (rond et lignes) et Rht3 (losange et ligne pointillé) en fonction des degrés jours depuis le semis. Saison 1 de l'essai à boigneville du projet ECHAP 2010-2014.

**Saisons 2 (2010-2011) et 3 (2011-2012).** Les épidémies se sont bien développées lors des saisons 2 et 3 de l'essai sur la variété Tremie. Les 5 dernières feuilles des plantes montrent des niveaux de sévérité assez élevés de septoriose (Figure 15). On observe cependant des différences dans le développement des épidémies entre les 2 saisons.



**Figure 15.** Développement de la septoriose sur les 5 feuilles du haut du couvert (1= feuille drapeau). A : données de la saison 2 de l'essai (Tremie 2012) et B : saison 3 (Tremie 2013). La sévérité de septoriose est exprimée en % de surface. En x : degré-jours depuis le semis. Projet ECHAP 2010-14

La contamination des feuilles au cours du printemps se produit de façon ordonnée sur les feuilles successives pour les 2 saisons de l'essai (Figure 15) : la feuille 5 est malade avant la feuille 4, puis la feuille 3, la feuille 2 et enfin la feuille drapeau. Cet ordre est lié à l'ordre d'apparition des feuilles sur les plantes qui permet des infections plus précoces sur les feuilles apparues avant. Cependant, la dynamique de montée de la maladie sur les feuilles successives montre des différences entre les 2 saisons de l'essai.

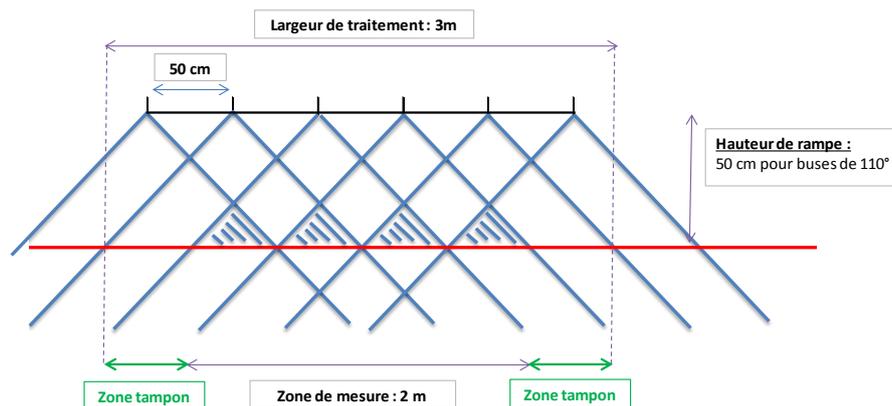
La montée de la maladie est plus régulière en saison 3, avec des courbes de sévérité de type logistique, quasi-parallèles entre étage foliaire. Cela suggère des conditions climatiques avec une plus grande fréquence de conditions favorables en saison 3, ayant induites des infections sur les feuilles au fur et à mesure de leur apparition. Les écarts entre les courbes de maladie sont d'ailleurs de l'ordre de la durée séparant la sortie des 2 feuilles successives (1 phyllochrone i.e. 100 degré-jours).

En saison 2, les feuilles 4, 3, 2 et 1 montrent des développements de maladie ordonnés mais les courbes sont moins parallèles et les sévérités maximales de maladie atteintes sont plus faibles qu'en saison 3. On observe un plateau de sévérité de maladie sur les feuilles 2, 3 et 4 vers 1500 dd après le semis, qui induit un ralentissement de la colonisation de ces feuilles par rapport aux courbes de type logistique observées en saison 3 (Figure 15). La feuille drapeau, montre un développement épidémique plus lent en saison 2.

Ainsi, les épidémies de septoriose sont différentes pour les 3 années de l'expérimentation et montrent un effet marqué de l'architecture et du climat sur les épidémies.

### **III2c. Interception de colorant sur les différentes feuilles des plantes**

Le colorant tartrazine a été utilisé pour caractériser le dépôt du colorant sur les feuilles après une application de produit à différents volumes, pour les différentes variétés du projet et pour 2 dates d'applications (donc 2 stades de développement du couvert) (Figure 16).



**Figure 16:** Zone de triple recouvrement créée par le jet de pulvérisation. En noir, la rampe et les six buses et en bleu les jets de pulvérisation et la zone de triple recouvrement hachurée (Arvalis - Institut du Végétal). Projet ECHAP 2010-2014.

Le colorant tartrazine, utilisé en alimentation humaine sous le nom E102, est de couleur jaune. L'objectif est de mimer une application fongicide en mélangeant la tartrazine à de l'eau. On obtient ainsi une « bouillie de colorant » qui est pulvérisée à 200 l/ha, 150 l/ha, 80 l/ha et 40 l/ha. Les mesures d'interception ont été faites sur les trois saisons de l'essai.

Après l'application, les feuilles sont prélevées et mises en solution dans un tube à essai contenant 10 ml d'eau. Puis les échantillons sont passés au spectrophotomètre calibré à la longueur d'onde de 430 nm. La solution de référence est de l'eau distillée. La dose du traceur est calculée de façon à obtenir une concentration convenable sur les échantillons dilués selon le protocole décrit ci-dessus. Pour faciliter les calculs, il est préférable de fixer la concentration de tartrazine à la sortie du pulvérisateur. Dans les essais de la saison 1 la dose de colorant à la sortie de la buse était de 240 g/l quel que soit le volume. Etant donné les fortes dilutions qui ont dû être faites pour le dosage, cette concentration a été réduite à 150 g/l pour les saisons 2 et 3 de l'essai. Cette modification de concentration n'engendre pas des différences trop importantes de taille des gouttes (IRSTEA, 2011).

La « bouillie de colorant » est constituée d'une certaine quantité de colorant complétée avec de l'eau pour atteindre le volume souhaité. La concentration de tartrazine étant invariable à la sortie du pulvérisateur, les quantités de colorant pulvérisées sont différentes en fonction du volume (Tableau 7). Pour comparer les résultats entre volumes et entre années, il faut donc procéder à une normalisation, en rapportant les quantités retenues par les feuilles aux quantités pulvérisées.

Deux pulvérisations ont été faites : au stade 1 nœud et au stade dernière feuille étalée. La première pulvérisation correspond à des stades de Haun (HS) entre 9 et 10 pour les différentes saisons de l'essai. Les 4 dernières feuilles visibles des maître brins ont été utilisées pour les mesures. Lors du premier traitement, les petites feuilles en croissance n'ont pas été récoltées et ce sont les feuilles 2 à 5 qui sont mesurées. Pour la deuxième application, les feuilles étaient toutes ligulées et ce sont les feuilles 1 à 4 qui sont mesurées.

Les quantités de colorant interceptées par les quatre feuilles des blés aux 2 dates d'application ont été analysées en considérant les quantités de tartrazine déposées par feuille et par unité de surface foliaire. Les quantités déposées ont été normalisées, c'est-à-dire qu'elles ont été divisées par le taux de d'application (masse de tartrazine appliquée par unité de surface).

Volume (l/ha)	Quantité déposée (g) en saison 1	Quantité déposée (g) en saisons 2 et 3
200	48000	30000
150	36000	22500
80	19200	12000
40	9600	6000

**Tableau 7:** Quantités appliquées en fonction des campagnes et des volumes de traitement dans l'essai de Boigneville, projet ECHAP.

**Total déposé sur les 4 feuilles.** Les sommes des dépôts sur les quatre dernières feuilles des maîtres brins sont très différentes selon la variété, l'année et le stade d'application. Mais le volume de bouillie a un effet très limité sur le total intercepté.

Lors de la première pulvérisation, la somme des quantités de colorant interceptée par les 4 feuilles supérieures varie de plus de 100% entre les 4 lignées avec 4,2g, 5,2g, 7,9g et 9,5g de produit intercepté (par g de colorant appliqué par cm<sup>2</sup>) pour les lignées Mercia en saison 1, Tremie en saison 3, Rht3 en saison 1, et Tremie saison 2 respectivement. Les feuilles des blés Mercia ont ainsi retenu environ deux fois moins de tartrazine que celles des blés Rht3. Les résultats pour la variété Tremie montrent une interception de colorant deux fois plus forte en saison 2 qu'en saison 3 lors de cette pulvérisation.

Lors de la seconde pulvérisation, la somme des quantités interceptées par les 4 feuilles sont de 3,5g, 5,8g, 9,5g et 12,2g (par g de colorant appliqué par cm<sup>2</sup>) pour les lignées Mercia saison 1, Rht3, saison 1, Tremie saison 3 et Tremie saison 2. Les écarts entre les lignées sont plus importants qu'à la première pulvérisation. Les lignées utilisées en saison 1 interceptent nettement moins que les blés de la variété Tremie utilisées en saison 2 et 3. Pour cette variété, le total intercepté par les 4 feuilles supérieures lors de la deuxième pulvérisation est plus important que pour la première pulvérisation.

**Profil de dépôt sur les 4 feuilles.** Le dépôt de Tartrazine varie fortement avec le rang des feuilles et cette relation, i.e. le profil de distribution varie selon les lignées et les années. Le volume de bouillie a de nouveau un effet très limité sur le profil d'interception des feuilles.

Lors de la première application, le profil de distribution du colorant sur les 4 feuilles supérieures est assez proche sur les blés Mercia, Rht3 (saison 1) et Tremie en saison 2 : la feuille 2 reçoit la quantité la plus importante de colorant, puis le dépôt diminue sur les feuilles 3 et 4. La quantité reçue sur la feuille 1 est inférieure ou proche de celle reçue sur la feuille 2. Les blés du cv. Tremie en saison 3 ont une distribution différente : les feuilles 1 retiennent moins que les feuilles 2, 3 et 4 qui ont elles un dépôt assez proche. Cependant, exprimés en unité de surface de feuilles, les profils d'interception changent sauf pour les blés cv. Tremie saison 3 : la distribution devient plus stable entre les feuilles.

Lors de la seconde pulvérisation, on observe à nouveau que le profil de distribution des interceptions sur les feuilles présente un maximum pour la feuille 2, et ce pour les 4 situations expérimentales. La décroissance du profil entre les feuilles 3 et 4 est plus ou moins marquée selon les situations ainsi que la croissance du profil entre les feuilles 1 et 2. Exprimées par unité de surface de feuilles, les profils d'interception changent, avec des interceptions sur les feuilles drapeaux et feuilles 2 qui se rapprochent, et une décroissance des interceptions par unité de surface sur les feuilles 3 et 4.

	numDF	denDF	F	P
(Intercept)	1	2015	226.32531	<.0001
Situation	3	2015	27.32061	<.0001
Volume	3	12	1.17156	0.3612
Stade	1	2015	23.062	<.0001
Feuille	3	2015	1.81324	0.1427
Situation:Volume	9	2015	1.61247	0.1061
Situation:Stade	3	2015	49.28034	<.0001
Volume:Stade	3	2015	1.9758	0.1156
Situation:Feuille	9	2015	10.69587	<.0001
Volume:Feuille	9	2015	1.89188	0.049
Stade:Feuille	3	2015	6.84526	0.0001

**Tableau 8 :** ANOVA pour les dépôts de colorant par feuille (niveau de significativité :  $P < 0.05$ )

L'analyse de variance sur les quantités interceptées par les feuilles indique que les dépôts moyens pour les différentes feuilles (tableau 8) sont significativement affectés par la variété, l'année d'application et le stade de développement des plantes (1<sup>ère</sup> ou 2<sup>nde</sup> application), 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 niveau foliaire sont donc différents selon la variété et l'année considérées. Cette analyse confirme que, dans nos conditions de culture le volume de bouillie n'influence pas les quantités de tartrazine interceptées par les feuilles.

En conclusion les mesures de dépôt de colorant sur les feuilles montrent que :

- Il n'y a pas d'effet du volume de bouillie sur le dépôt sur les feuilles du haut du couvert
- Les quantités déposées sur les feuilles varient fortement selon les architectures, les dates de traitement et les années avec des interactions entre ces facteurs
- Considérer les différences de surface foliaire entre les architectures n'est pas suffisant pour expliquer les différences de quantité interceptée par les feuilles

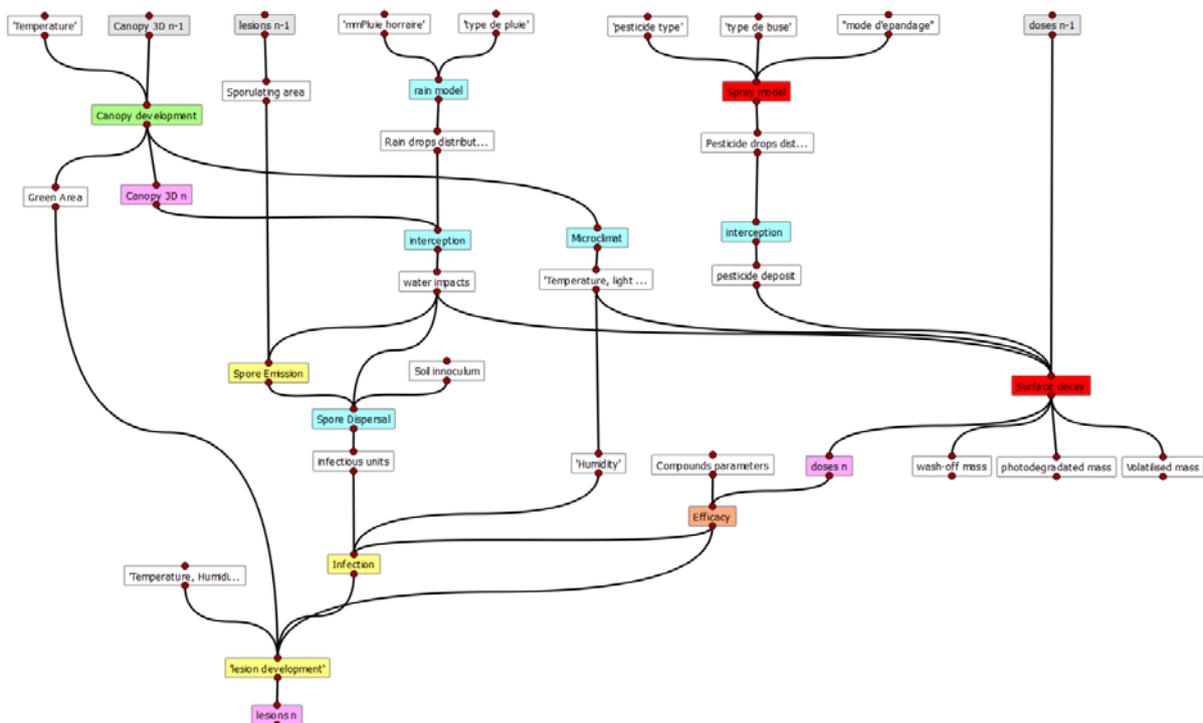
### III3. Développement d'une boîte à outils logicielle pour la simulation et l'évaluation de stratégies de traitement dans des architectures variées

INRIA CIRAD INRA VP (Fournier C., Pradal C.) ; INRA ECOSYS (Abichou M., Andrieu B., Bancal M.O., Bedos C., Benoit P., Chapuis R., Chambon C., Gagnaire N., Mamy L., Pot V., Pointet S., Robert C., Saint Jean S.), INRA BIOGER (Walker A.S.), Alterra (van den Berg E.), ADAS (Paveley N.), IRSTEA (Sinfort, C.)

L'objectif est de créer un outil de simulation des stratégies de traitement fongicide qui prend en compte les architectures des couverts et d'y associer des critères variés d'évaluation.

#### III3a. Simulation de stratégies de traitements dans des architectures variées.

**Septo3DFongi.** Septo3DFongi est un logiciel qui simule, à l'échelle du couvert végétal, en 3 dimensions et au cours du temps, le développement des plantes, le développement de la septoriose, le devenir des fongicides sur les feuilles et l'effet des fongicides sur la septoriose. Pour le construire, différents modèles capables de traiter en partie l'un ou l'autre de ces aspects sont réunis dans une plateforme unique (OpenAlea, Pradal et al. 2008), sous la forme de composants logiciels (unités de programmation indépendantes) interopérables. Certains composants déjà existants sont adaptés et re-paramétrés, d'autres sont développés de novo dans le projet, puis sont couplés ensemble (Figure 17). Les composants intègrent les connaissances obtenues dans les tâches 1, 2 et 3 du projet (partie II.1 du rapport).



**Figure 17 :** Diagramme montrant les différents composants du modèle Septo3DFongi (boîtes de couleur), les principaux objets représentant le système (boîtes roses et grises) et les principales entrées ou variables de couplage entre modèles (boîtes blanches). Les différentes couleurs indiquent le groupe fonctionnel auquel appartient le composant : développement du couvert (vert), interception

et dispersion (bleu), devenir du pesticide sur les feuilles (rouge) et effet du fongicide sur la septoriose (saumon). Les connecteurs montrent les liens entre les composants. Projet ECHAP 2010-2014.

D'un point de vue fonctionnel, ce modèle permet la simulation:

- du développement de la plante en 3D (tâche 1)
- du cycle infectieux de *Mycosphaerella graminicola* (tâche 1)
- de la dispersion des spores (tâche 1)
- de l'interception du fongicide par les plantes et les feuilles en particulier (tâche 3)
- de la persistance du fongicide sur la feuille (tâche 3)
- de l'effet des fongicides sur le cycle infectieux (tâche 2)
- de l'érosion de l'effet du fongicide (tâche 2)

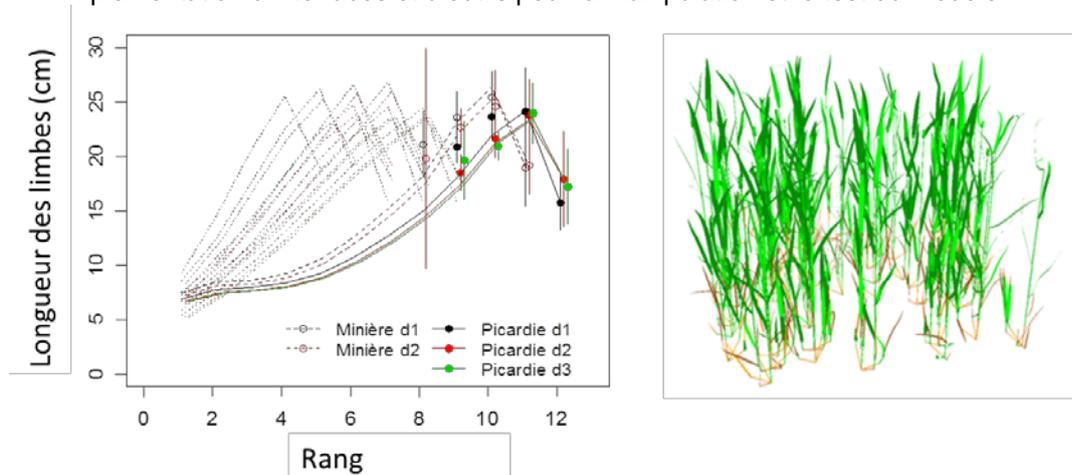
Du point de vue logiciel, 'Septo3DFongi' se présente comme une application à composants inter-opérables sous OpenAlea (Pradal et al., 2008), Chaque modèle assurant une des fonctions décrites ci-dessus peut être utilisé de façon indépendante ou couplé aux autres composants. Ceci permet d'obtenir, par assemblage dans une interface de programmation visuelle (Figure 17), des modèles 'dérivés' du modèle global, simulant par exemple uniquement l'effet d'un fongicide sur une feuille ou le devenir des pesticide sur les plantes 3D. Cette particularité du modèle a été utilisée pour réaliser le test des composants de façon indépendante ou couplés deux à deux. Elle permet également une souplesse d'utilisation et d'amélioration du modèle.

La suite du rapport présente, par fonctionnalité, les différents modèles utilisés comme composants, en insistant sur les développements effectués pendant le projet ECHAP.

**Simulation du couvert végétal.** ADEL-Wheat (Fournier et al., 2003) simule en 3D et au cours du temps un petit couvert de blé. Il est composé d'un modèle géométrique simulant l'évolution des formes des tiges et des feuilles et d'un modèle de simulation de la croissance et de la sénescence des plantes à l'échelle des organes individuels (Figure 18). Le modèle de croissance et de sénescence prend en compte de façon dynamique les effets de la température sur la vitesse de développement globale de la plante. Il ne simule pas d'autre processus de régulation, mais il permet de prédire, à partir de notations effectuées sur les maitres brins et d'une caractérisation sommaire du tallage, l'ensemble du développement des organes présents sur une plante, ainsi que la démographie du nombre d'axe au cours du temps (Figure 18). Cette capacité de prédiction, associé au modèle 3D, permet une souplesse de calage : le modèle est capable d'assimiler une variété de mesures (images, morphométrie, phénologie, dénombrements).

Les nouveaux développements effectués durant le projet ECHAP ont été :

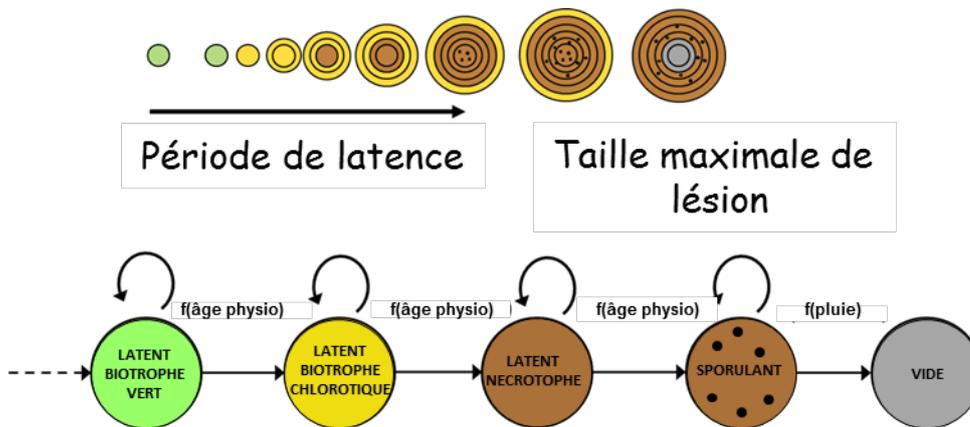
- Le test et l'adaptation des formalismes proposés par Abichou et al. (2014) pour modéliser le tallage et le développement des organes.
- L'extension du modèle de croissance pour prendre en compte les incidents de culture et prédire le comportement des organes portés par des axes de même ordre mais comportant un nombre de phytomères différents (tâche 1).
- l'extension du modèle géométrique (Fournier et al. 2012) permettant la compatibilité avec les nouveaux modèles de dynamiques d'affaissement des feuilles (tâche 1)
- l'implémentation d'interfaces et d'outils pour la manipulation et le test du modèle.



**Figure 18** : Gauche : Simulation des dimensions des limbes sur les différents axes d'une plante de blé (lignes) à partir des longueurs mesurées des 4 dernières feuilles (points). A droite : image d'une simulation avec ADEL-Wheat d'un petit couvert de blé. Projet ECHAP 2010-2014

**Cycle infectieux.** Le modèle de cycle infectieux de *Mycosphaerella graminicola*, Septo3D-Cycle, est issu du modèle Septo3D (Robert et al., 2008). Il permet de simuler l'infection de feuilles par des spores, et le développement des lésions issues de ces spores, depuis l'apparition des chloroses jusqu'à la sporulation (Figure 19). Il simule les effets de la température, de l'humidité et des pluies sur les différentes phases du cycle, ainsi que l'interaction avec la propagation de la senescence naturelle sur les feuilles.

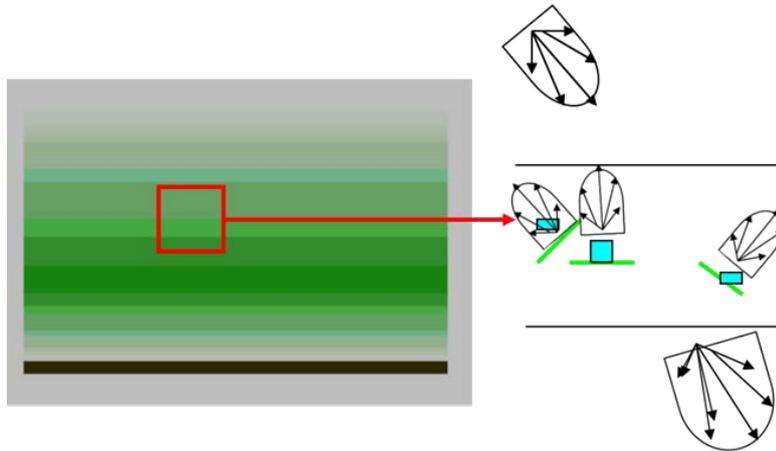
Les principaux développements effectués dans le cadre du projet ont été d'extraire le module de cycle infectieux de septo3D pour obtenir un composant interopérable sous OpenAlea (Garin et al., 2014). Le modèle a aussi été étendu pour prendre en compte les effets des fongicides sur le cycle infectieux (cf ci-dessous).



**Figure 19** : Modélisation du développement d'une lésion dans le modèle Septo3D-Cycle (haut) et graphe de transition d'état des lésions (bas). Après germination, une spore forme une lésion en incubation (vert). Puis à la fin de la période d'incubation, les symptômes chlorotiques (jaune) apparaissent et sont structurés par âge par ajout successif de couronnes concentriques. Chaque couronne suit un développement physiologique fonction de la température qui la fera passer dans les états latent-chlorotiques (jaune), nécrotiques (marron) et nécrotiques-sporulant (marron à pois). Après épuisement des spores, la lésion devient nécrotique-vide (gris). Projet ECHAP 2010-2014

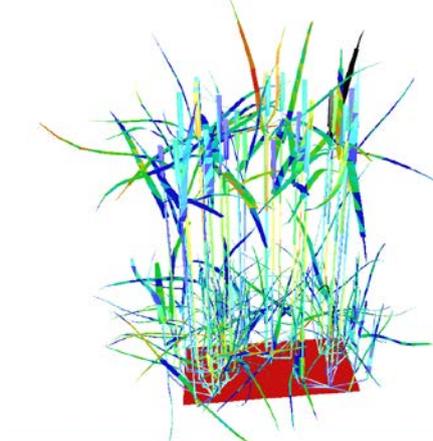
**Dispersion des spores.** Le modèle de dispersion des spores, Septo3D-dispersion, est issu du modèle Septo3D (Robert et al., 2008). Il permet de simuler l'interception de la pluie par chacune des feuilles du couvert, ainsi que le transport des gouttelettes infectieuses émises par les lésions situées sur ces feuilles (Figure 20). Le modèle de transport simule l'arrachement des spores par les gouttes de pluie incidentes, le splashing de ces gouttes en gouttelettes, et le dépôt des gouttelettes contenant les spores.

Comme pour le modèle de cycle infectieux, le module de dispersion de Septo3D a été extrait pour en faire un composant interopérable sous OpenAlea (Garin et al. 2014). Un nouveau modèle de simulation de l'interception des pluies et d'émission de gouttelettes a été développé (tâches 1 et 3) pour travailler en 3D. Ce modèle est obtenu en couplant un modèle d'interception de la lumière (Caribu, Chelle et al., 1997) et un modèle de pluie-splashing (Saint-Jean et al., 2006). Le modèle d'interception permet le calcul des surfaces exposées à la pluie, en assimilant celle-ci à un rayonnement unidirectionnel vertical. Le modèle de pluie-splashing calcule une distribution statistique du diamètre et de la vitesse des gouttes de pluie à partir des intensités de pluie, ainsi qu'un nombre de gouttelettes émises lors des impacts sur les feuilles.



**Figure 20 :** Modélisation de la dispersion des spores de Septo3D-dispersion. Le couvert 3D est représenté sous forme de couches 1D plus ou moins denses (raies vertes) et ayant intercepté une certaine quantité de pluie (interception calculée en 3D au préalable). Les gouttelettes émises lors de splash sont représentées sous forme de distributions angulaires plus ou moins denses (cônes avec flèches) selon les directions d'émission. Le modèle calcule et intègre les émissions par couche, puis propage les flux dans le couvert en 3D. Projet ECHAP 2010-2014.

**Interception des fongicides.** Le modèle d'interception des fongicides par les feuilles est proche du modèle d'interception de la pluie présenté dans la paragraphe précédent (Figure 21). Il couple un calcul des surfaces exposées au fongicide, obtenu par un calcul d'interception de lumière en visée verticale (Caribu, Chelle et al. 1997), et un modèle de dépôt (tâche 3). Le modèle de dépôt prend en entrée une distribution statistique des diamètres et des vitesses des gouttelettes émises par les buses d'épandage, obtenue par calibration de l'appareil (tâche 3), et un débit d'épandage. En sortie, il fournit une surface impactée par les gouttes tenant compte des recouvrements gouttes à gouttes et la proportion de produit ayant adhéré, perlé ou splashé au contact des feuilles.

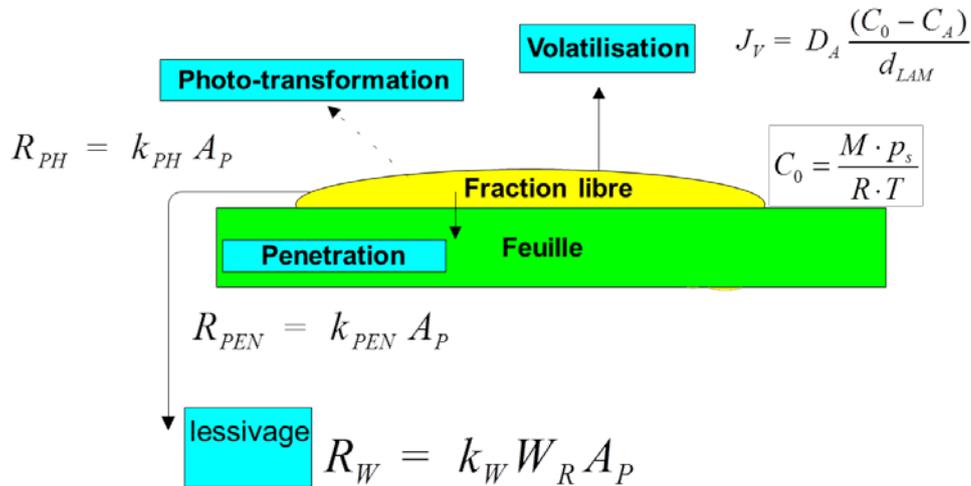


**Figure 21 :** Simulation de l'interception et du dépôt d'un fongicide sur un petit couvert de blé, avec le modèle Caribu (Chelle et al. 1997) couplé à un modèle de dépôt. La couleur (de bleu à rouge) indique la quantité de produit déposé. Projet ECHAP 2010-2014.

**Devenir des fongicides sur la feuille.** Le modèle de persistance de fongicide est issu du modèle Pearl (van den Berg et al., 2008). Il permet de simuler la dynamique d'évolution de la fraction 'libre' de produit fongicide présent à la surface des feuilles (Figure 22). Il simule les pertes par volatilisation, photo-dégradation et lessivage en fonction de la température, de la lumière incidente et de la vitesse du vent. Il ne simule pas le devenir du produit ayant diffusé dans la cuticule.

Le principal développement effectué durant le projet a été d'encapsuler le modèle Pearl (initialement développé pour simuler un couvert) sous la forme d'un composant interopérable utilisable dans OpenAlea à l'échelle des feuilles individuelles. Cette transformation étend le modèle Pearl qui devient capable de simuler le devenir des produits sur chacune des feuilles d'un couvert, en tenant compte des conditions locale de température, d'éclairement et d'exposition à la pluie. Les expérimentations de

la tâche 3 ont été utilisées pour établir une paramétrisation du modèle pour les fongicides étudiés dans le projet.



**Figure 22** : Modélisation de la persistance de la fraction libre des fongicides sur les feuilles. Les boîtes bleues indiquent les processus pris en compte par le modèle Pearl, avec les équations utilisées. Projet ECHAP 2010-2014.

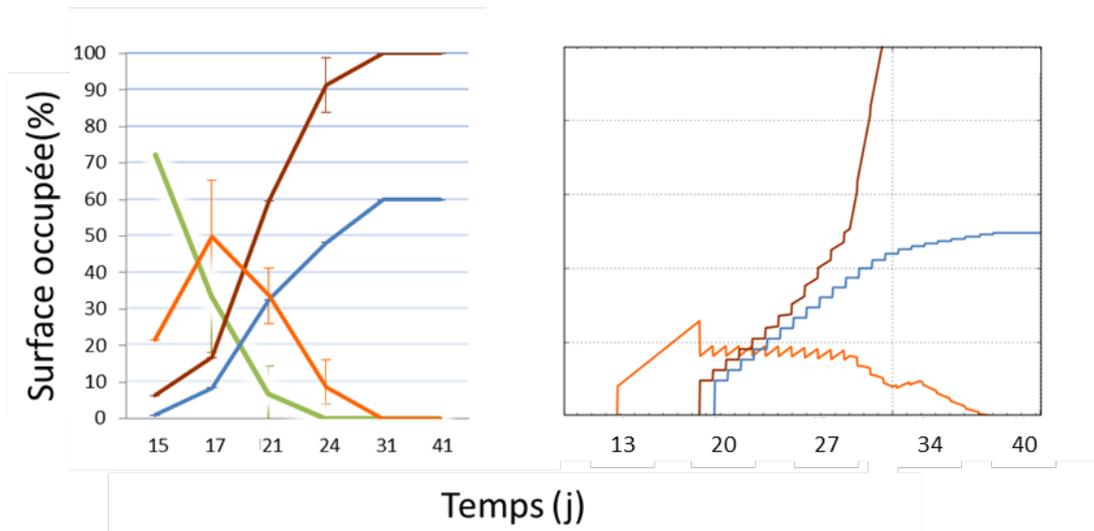
**Effet des fongicides sur le cycle infectieux.** La simulation des effets des fongicides sur le cycle infectieux est adapté du modèle de Milne et al. (2007). Celui-ci repose sur le concept d'efficacité biologique des produits, défini comme la capacité relative d'une certaine dose de produit à contrôler un développement épidémique. Le modèle distingue l'efficacité de protection et l'efficacité curative. Le modèle de Milne et al. (2007) inclut :

1. un modèle simulant la diminution de la quantité de fongicide sur et dans la feuille et donc la diminution de son efficacité au cours du temps
2. un modèle qui calcule l'efficacité de protection et curative d'un mélange de fongicides à partir des quantités respectives des différents produits
3. un modèle qui lie efficacités des fongicides et développement épidémique

Les deux premiers sous-modèles ont été recodés sous la plateforme OpenAlea. Le troisième sous-modèle n'a pas été recodé, mais transposé dans Septo3D-Cycle en développant une nouvelle extension. Cette extension permet à Septo3D-Cycle de réguler le cycle épidémique en fonction des efficacités biologiques des fongicides. Les régulations introduites sont :

- Régulation de la germination des spores en fonction de l'efficacité de protection
- Régulation de la vitesse de développement des lésions en fonction de l'efficacité curative

Ce modèle de régulation été paramétré pour le chorotalonil et l'époxiconazole, à partir d'expérimentations de suivi de feuilles inoculées en conditions contrôlées du projet ECHAP (tâche 2, Figure 23).



**Figure 23 :** Simulation des effets du fongicide sur le développement d'une lésion. Gauche : développement des surfaces vertes (vert), chlorotiques (orange), nécrotiques (marron) et nécrotiques sporulantes (bleu) mesurées en conditions contrôlées. Droite : simulation par le modèle de ces surfaces pour les mêmes conditions. Projet ECHAP 2010-2014.

**Couplage du modèle de persistance des fongicides sur les feuilles et du modèle d'effets des fongicides sur le cycle infectieux.** Les deux effets des fongicides pris en compte dans les régulations du cycle infectieux concernent des processus a priori séparés spatialement : le processus de germination se déroule à la surface des feuilles et se poursuit via la pénétration des hyphes dans les cavités sous-stomatiques alors que le développement des lésions concerne des processus localisés dans les tissus plus internes des feuilles (apoplasme et cytoplasme des cellules). Cette spatialisation existe également pour les produits fongicides, qui sont localisés pour partie à la surface des feuilles, pour partie dans les différentes couches de la cuticule et pour partie dans les tissus internes à la plante.

Dans Septo3DFong, le modèle de simulation de la diminution de l'efficacité biologique des fongicides au cours du temps, issu de Milne et al., (2007), peut techniquement s'utiliser indépendamment du modèle simulant la persistance des produits en surface. Dans ce cas on ne tient pas compte, pour calculer les quantités de produits efficaces biologiquement, des calculs des pertes physiques de produit par le modèle de persistance, ni de la localisation des produits, et a fortiori d'un lien entre localisation des produits et effets sur le cycle. Cette option a cependant un sens car le modèle de persistance ne permet actuellement pas de prédire le devenir du fongicide une fois pénétré, et donc ne permet pas de remplacer en totalité le modèle de diminution des efficacités biologiques.

Septo3DFong offre cependant une alternative établissant un lien entre les modèles. Dans ce cas, on fait l'hypothèse que la fraction libre calculée par le modèle de persistance détermine l'effet de protection, et que la fraction de produit pénétrée détermine l'efficacité curative. Concernant les diminutions de produit, on considère alors que la diminution d'efficacité de la fraction surfacique est gérée par le modèle de persistance uniquement, et que la diminution d'efficacité de la fraction pénétrée est gérée par le modèle de Milne et al. (2007). Le choix de l'une ou l'autre des alternatives dépend du fongicide, et peut être en partie raisonné à partir d'une comparaison des dynamiques de diminution d'efficacité prédites par les 2 modèles pris indépendamment et du modèle couplé. Dans le projet, cette comparaison est faite pour le chlorothalonil et l'époxyconazole.

Dans le cas de l'époxyconazole, qui a, selon le modèle de Milne (2007), un double effet (curatif et protection), le modèle de persistance (Pearl) prédit un transfert quasi intégral de la fraction de produit libre présent en surface vers la cuticule et les couches internes, en une dizaine de jours. Le modèle de Milne et al. (2007) prédit par contre une diminution de l'efficacité biologique sur une période 4 fois plus longue. Ceci suggère une participation non négligeable de la fraction pénétrée (cuticule ou cellules) à l'effet de protection, et infirme donc l'hypothèse d'un effet de protection uniquement lié à la fraction libre pour ce produit. Par rapport au modèle de Milne utilisé seul, le modèle couplé prédit un retard de 10 jours de la mise en place de l'efficacité curative du produit, sans en modifier l'intensité (la totalité

du produit pénètre). Ceci constitue une différence de prédiction intéressante, mais assez ténue pour être tranché facilement.

Dans le cas du chlorothalonil, le modèle de Milne et al. (2007) prédit uniquement un effet curatif qui décroît lentement (60 jours). Le modèle de persistance (PEARL) indique, comme dans le cas précédent, que la pénétration prend une dizaine de jour. Par contre les pertes de produits par volatilisation et photodégradation durant la pénétration sont importantes (40%). En plus de l'effet retardant, le modèle couplé prévoit donc également une diminution de l'effet curatif. Cette différence de prédiction est plus importante que pour l'epoxyconazole, et pourrait sans doute être tranchée expérimentalement. .

### **III3b. Evaluation multicritères des stratégies de traitements**

Septo3DFongi permet de simuler le système dans son ensemble : développement de la plante, des épidémies et du fongicide. 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.

**Niveau épidémique.** Pour estimer le niveau épidémique de façon synthétique, nous avons utilisé l'AUDPC (aire sous la courbe de progression de la maladie, Madden et al. 2007). Cette statistique a l'avantage de prendre en compte la précocité et l'intensité du développement de la maladie sur les feuilles. Les stratégies de protection fongicides ciblant principalement une réduction des épidémies sur les feuilles du haut couvert, nous avons choisi un indicateur basé sur les courbes de maladie des 3 dernières feuilles. De plus, pour pouvoir comparer de façon relative des développements épidémiques sur des couverts présentant des surfaces de feuille différentes, les AUDPC calculés sont normalisés par une valeur théorique maximale, obtenue en considérant une infection totale des feuilles dès leur sortie (AUDPC normalisée, Robert et al. 2008).

L'indicateur de développement épidémique, E, s'obtient donc par :

$$E = \sum_{k=0}^3 \frac{AUDPC_k}{AUDPC_{max_k}}$$

où  $AUDPC_k$  est l'aire sous la courbe moyenne de progression des nécroses de la feuille k (k = rang de feuille depuis le haut) et  $AUDPC_{max_k}$  l'aire sous la courbe moyenne de progression des nécroses en considérant une infection totale dès la sortie de la feuille k

**Rendement des blés.** Le modèle de blé utilisé est centré sur le développement de l'architecture et ne simule pas directement le rendement des plantes. L'utilisation couplée des modèles ADEL et Caribu, inclus dans Septo3D fongi, permet cependant de calculer précisément la quantité de rayonnement interceptée par les parties vertes des plantes au cours du temps (Fournier et al., 1999, Evers et al. 2006, Louarn et al. 2008, Barillot et al. 2014). Ce cumul de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (PARc) est lui-même linéairement relié à la quantité de biomasse produite par la culture (Monteith, 1977, Louarn et al., 2008). Cette dernière est linéairement reliée, en première approximation, au rendement des plantes (Cordery et al., 1989). Le modèle s'écrit donc :

$$R = RUE \times HI \times PARc$$

où R est la masse des parties récoltées (g), RUE l'efficacité de conversion du rayonnement ( $g.MJ^{-1}$ ) et PARc le cumul de rayonnement intercepté (MJ)

L'influence des épidémies sur le rendement est calculée en sachant que le principal dommage lié à la septoriose passe par une diminution des surfaces vertes des feuilles (Robert et al. 2004 et Bancal et al. 2007). Ainsi, le rayonnement intercepté par chacun des éléments de feuilles, calculé par les modèles Adel-Caribu, est donc multiplié par la fraction verte de cet élément (non infectée), telle que calculée par le modèle de cycle infectieux de Septo3DFongi.

L'indicateur de rendement proposé reflète donc principalement la variation de rayonnement intercepté par les feuilles attaquées, qui est influencé par l'architecture et le développement épidémique.

**Erosion d'efficacité des fongicides.** Septo3DFongi ne simule pas les mécanismes de sélection de souches résistantes, à l'origine de l'érosion de l'efficacité des produits (Hobbelen, 2014). Il est par contre possible d'estimer des indicateurs de l'érosion à partir de la quantité de produit appliquée et du nombre d'applications, en utilisant des courbes empiriques d'érosion de l'efficacité des produits établies pour différents niveaux de ces facteurs par le réseau AFPP ( $C_e(Q, n)$ ). Nous avons choisi comme critère synthétique la durée de demi-vie du produit exprimant la durée après laquelle le produit a perdu 50% de son efficacité. L'influence de l'architecture sur ce critère est estimée en considérant que la pression de sélection était proportionnelle, non pas à la quantité de produit appliqué, mais à la quantité de produit intercepté par le couvert estimé par le modèle ( $Q_i$ ,  $\text{mg.m}^{-2}$ ). Le critère s'obtient donc par :

$D_{50}$  = demi-vie ( $C_e(Q_i, n)$ )

**Bilan environnemental.** L'évaluation du bilan environnemental des différentes stratégies fongicides est basée sur l'utilisation des modèles PRZM (version PRZM 3.21) et de PEARL (version PEARL 4.4.4). Ces modèles utilisent en entrée les simulations de plantes d'ADEL en terme de LAI et de taux de couverture et permettent en sortie d'obtenir les quatre indicateurs d'impact environnementaux suivants :

- Concentration maximum dans l'eau du sol à 1 m (comparaison à 0.1 ou 0.5  $\mu\text{g/l}$ ),
- 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

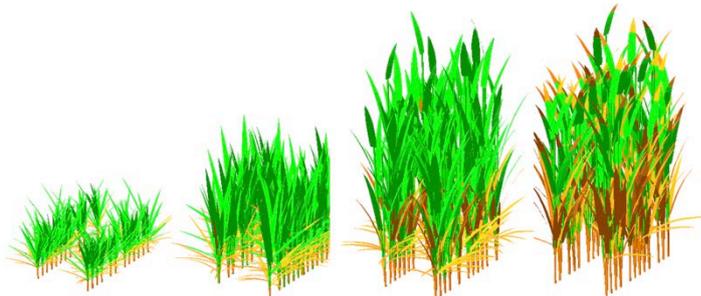
Des exemples d'évaluation de bilan environnemental sur les stratégies de traitements réalisées à Boigneville sont détaillés en partie III.6 du rapport.

### III4. Test du modèle Sepot3DFongi pour sa capacité à prédire les données de l'essai de Boigneville

#### III4a. Simulation de l'architecture des couverts

INRA LEPSE (Fournier C.) et INRA ECOSYS (Robert C., Abichou M., Pointet S.)

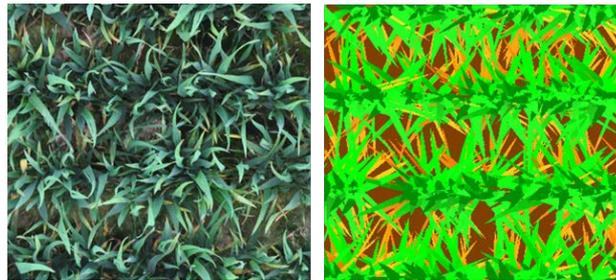
Les mesures effectuées dans les parcelles de l'essai sur les plantes (tallage), les maîtres brins (émission, sénescence, dimensions et port des feuilles), ainsi que les mesures de densité de plantes sont utilisées pour caler les paramètres du modèle de simulation de l'architecture des blés (figures partie III2a du rapport). A partir des données, le modèle infère l'architecture et le développement de la plante entière (axe principal et talles, figure 24).



**Figure 24 :** Simulation du développement de l'architecture 3D des blés de la variété Trémie, saison 3 des expérimentations avec le modèle de plante. Les images représentent un couvert de 30 plantes aux stades HS 4, 7, 10 et 13 (échelle Haun Stage). Projet ECHAP 2010-2014.

Le nombre et la qualité des données permettent d'estimer finement le développement des organes, mais ne permettent pas de caractériser finement les effets brusques des accidents de culture que sont les attaques de mouche en saison 1 et le fort gel en saison 2 sur l'émission et la durée de vie des talles. Pour modéliser ces effets, nous avons donc considéré des scénarios simples et sans doute réducteurs.

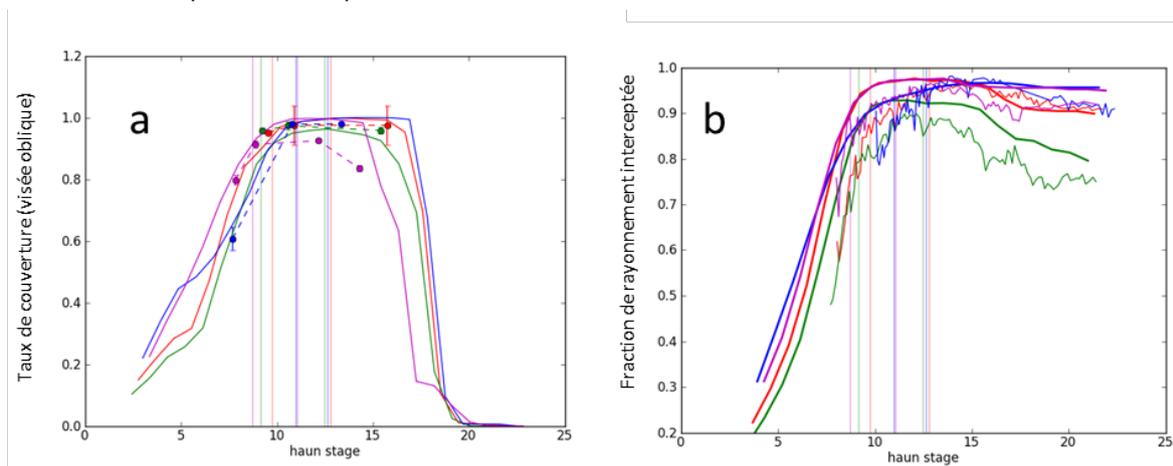
Le test de la capacité du modèle d'architecture à reproduire le développement du couvert est fait en comparant simulation et observation sur quatre variables mesurées à l'échelle du couvert : taux de couverture 'vert' en visée verticale ( $TC$ , figure 25), taux de couverture 'vert' en visée oblique ( $TC57$ , Figure 26), fraction de rayonnement intercepté (*Radiation Interception Efficiency*,  $RIE$ , Figure 26) et indice foliaire vert (*Leaf Area Index*,  $LAI$ ).



**Figure 25** : Photos du couvert Trémie saison 3 (stade 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.

Du semis à la montaison, i.e. du stade 0 à HS 7-8, les données concernent uniquement la variété Trémie, et sont en accord avec les simulations (Figure 26) : les valeurs de  $TC$ ,  $TC57$  et  $LAI$  sont inférieures en saison 3 par rapport à saison 2.

Aux stades supérieurs, la comparaison modèle vs observation se limite aux variables  $TC$  et  $RIE$ . En effet, la saturation du  $TC57$ , qui est bien simulée par le modèle, est atteinte dès le stade 9 sur l'ensemble des situations (Figure 26a). Ceci rend inapplicable la méthode d'estimation du  $LAI$  à partir des images. Les  $LAI$  verts simulés, à l'exception des blés Rht3, semblent cependant forts en comparaison des valeurs usuelles observées sur le blé (maximum autour de 6). Cette surestimation serait liée à une prise en compte sous-estimée des effets des incidents de culture.



**Figure 26** : Dynamiques d'évolution du taux de couverture en visée oblique (a) et de l'interception du rayonnement en fonction du stade de développement (b). En a les lignes continues représentent les simulations, les points et les lignes pointillées les données. En b, les lignes épaisses sont pour les simulations et les lignes fines pour les mesures. Les lignes verticales indiquent, pour chaque variété, les dates d'application des deux traitements de tartrazine. Projet ECHAP 2010-2014.

Du stade 9 au stade 13 (dernière feuille ligulée), 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

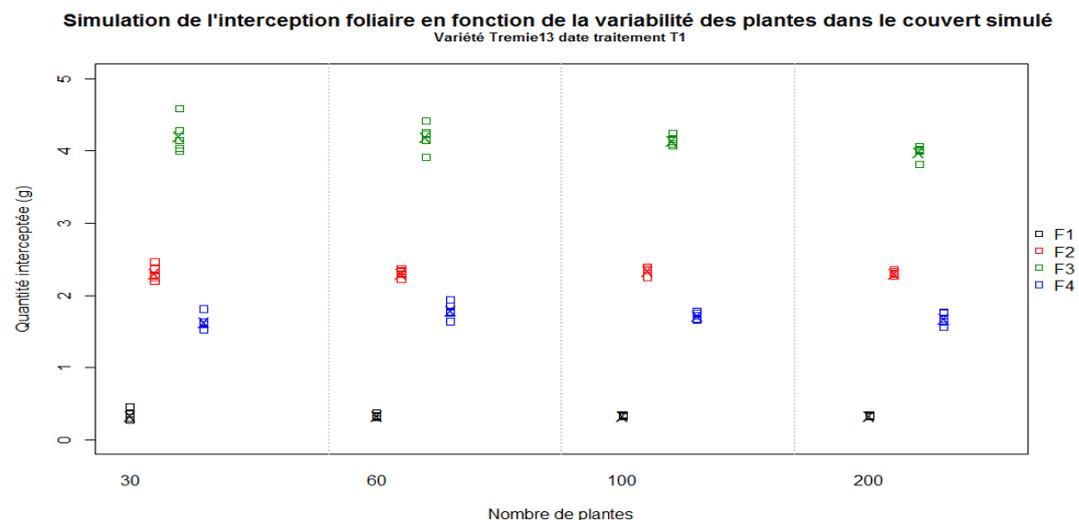
(Figure 26b). Le RIE étant un indicateur du taux de couverture totale (vert et sénescé), la comparaison indique donc que le modèle surestime globalement l'occupation des parties sénescées, et, dans le cas de Rht3 ne respecte pas le ratio vert/sénescé en visée verticale. Ceci peut s'expliquer par l'absence de simulation, dans le modèle, des contraintes mécaniques entre feuilles (dans le modèle, les feuilles peuvent s'inter-pénétrer). Dans le cas général, la présence d'une tige développée permet au modèle de respecter l'ordonnement des feuilles (feuilles vertes au-dessus des feuilles sénescées), mais pas dans le cas de Rht3.

Au-delà de la ligulation de la feuille drapeau, le modèle simule correctement les tendances d'évolution du TC et du RIE, et les différences entre variétés.

### III4b. Simulation de l'interception de colorant par les feuilles

INRA LEPSE (Fournier C.) et INRA ECOSYS (Robert C., Gagnaire N. Saint Jean S., Pointet S.)

Le travail de simulation a débuté par la détermination empirique du nombre de plante à simuler dans les micro-couverts virtuels (Figure 24) pour estimer correctement et de façon robuste l'interception sur les feuilles. En effet, un trop petit nombre de plante ne permet pas au modèle de représenter correctement les processus aléatoires et les variabilités de développement entre plantes. Nous avons testé la stabilité de l'interception calculée pour des micro-couverts comportant 30, 60, 100 et 200 plantes différentes semés à la densité de 280 plantes/m<sup>2</sup> (Figure 27). Les simulations réalisées avec 30 plantes différentes montrent une instabilité des simulations alors que celles faites avec un couvert composé de 200 plantes différentes sont très proches. Ainsi pour la suite du travail, les simulations ont été réalisées avec des couverts incluant des variabilités sur 200 plantes.



**Figure 27 :** Simulation de la quantité interceptée par feuille pour les 4 feuilles visibles du haut du couvert (5F1 est la feuille drapeau) pour un micro couvert (Tremie saison 3, première date de pulvérisation) comprenant 30, 60, 100 et 200 plantes individuelles différentes. Projet ECHAP 2010-2014.

La cohérence des simulations de l'interception de tartrazine par les feuilles face aux données varie selon la date de traitement et les lignées. Pour la première pulvérisation les simulations sont assez cohérentes pour la variété Tremie en saison 2, mais pour les 3 autres situations une tendance à surestimer les quantités interceptées simulées par rapport aux données est observée (Figure 28B).

Pour la deuxième date de pulvérisation de tartrazine, les simulations d'interception sont supérieures aux interceptions mesurées pour les lignées Mercia et Rht3, mais les simulations sont tout à fait cohérentes avec les données pour les blés Tremie en saison 2 et 3 (Figure 28A et 28C). L'hypothèse émise pour expliquer le décalage entre les simulations et les données pour les lignées de la saison 1 du projet est la difficulté de rendre compte de l'effet de la mouche grise sur les couverts de blés simulés.

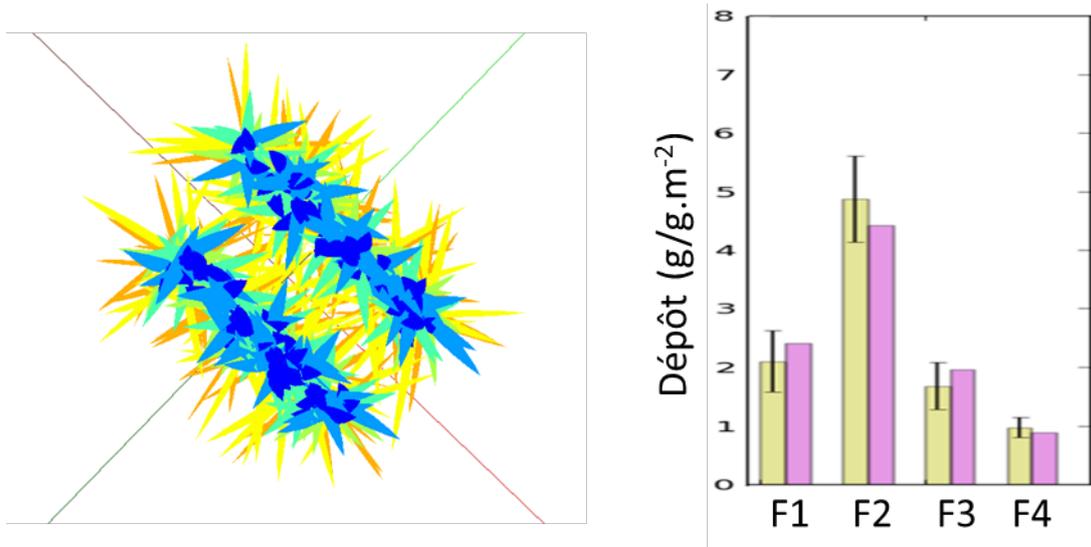


Figure 28 : Simulation de l'interception de tartrazine pour la variété Tremie saison 3, 2ième date de pulvérisation. A : Vue du couvert en visée verticale orthographique, permettant de visualiser les surfaces des feuilles exposées au fongicide. Les différentes couleurs indiquent les rangs de feuilles (feuille drapeau en bleu foncé). B : Données (barres jaunes) et simulation (barres roses) du dépôt de tartrazine sur les 4 feuilles supérieures des maitre-brins (F1 = feuille drapeau). Projet ECHAP 2010-2014.

### III5. Utilisation du modèle pour optimiser les traitements via l'architecture des couverts

INRA ECOSYS (Pointet S., Robert C.) et INRA LEPSE (Fournier C.)

#### III5a. Analyse de sensibilité de la simulation d'interception de fongicide pour différents facteurs d'architecture des couverts

Trois facteurs de variation d'architecture ont été testés pour leur effet sur l'interception de produit par les feuilles : le stade de développement des plantes, la dimension des feuilles et la densité d'axes du couvert (Figure 29). Ce travail a été réalisé en prenant comme couvert de référence le couvert reconstitué de la variété Tremie en saison 3 de l'essai à Boigneville et les la deuxième date de pulvérisation (dernière feuille étalée).

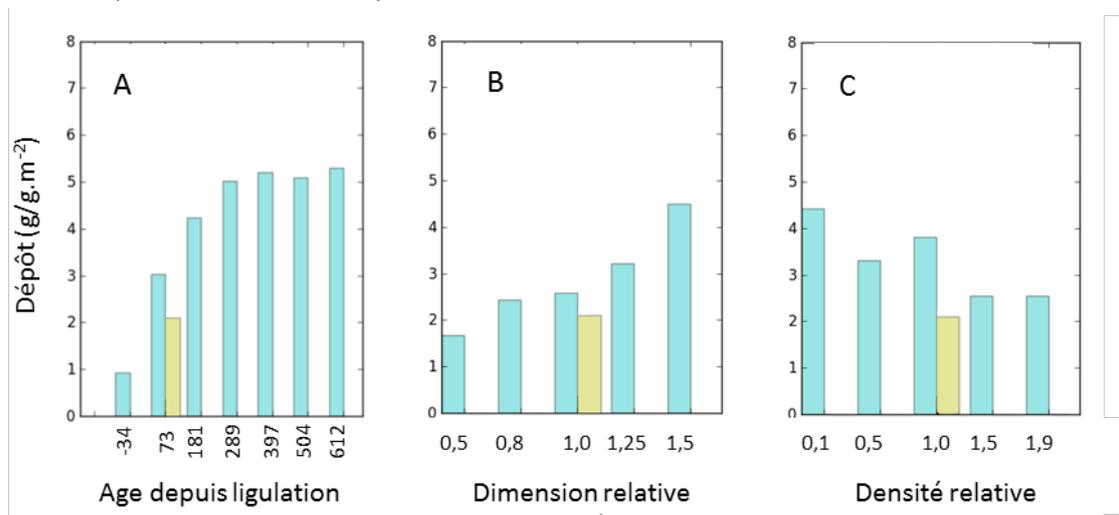


Figure 29 : Simulation de la quantité de colorant interceptée par la feuille drapeau (barres bleues) pour des variations de : A : stade de développement, B : surface des feuilles et C : densité de plante. Chaque barre correspond à une valeur du paramètre d'architecture. Cas de la variété Tremie, saison 3.

3, deuxième date de pulvérisation. L'interception de colorant observée est représentée en jaune. Projet ECHAP 2010-2014.

**L'effet du stade de développement** a été simulé en modifiant le stade de développement du couvert de -1 et +5 HS auquel la pulvérisation est faite. Cela correspond à un âge de feuille drapeau variant de -40 dd (feuille en croissance) à + 600 dd depuis la ligulation pendant l'application (Figure 29A). Le stade de développement des plantes a un effet très marqué sur la simulation de l'interception. Le choix de la date de pulvérisation est donc clé dans le raisonnement des stratégies. Pour la feuille drapeau, l'interception simulée augmente fortement pendant la croissance de la feuille. Cette augmentation continue mais de façon atténuée après la ligulation de la feuille jusqu'à stabilisation 300 dd post ligulation (Figure 29A). Cette augmentation est liée d'une part à l'affaissement de la feuille au cours de son vieillissement et également à la montée de l'entre nœud qui lui fait prendre une position supérieure dans le couvert. Ainsi, le stade de développement influence fortement les simulations d'interception par les feuilles à cause de changements d'architecture des plantes et le modèle développé dans le projet permet de simuler et de comprendre ces effets. Les simulations révèlent que décaler d'une semaine la date d'application peut modifier de plus de 100% la quantité reçue. On remarque par exemple que le traitement réalisé dans l'essai n'optimise pas la quantité reçue par la feuille drapeau par un traitement un peu trop précoce.

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 29B). Mais cet effet dépend du rang foliaire. Ainsi, le profil de surfaces des feuilles des variétés peut être un critère à considérer pour optimiser les traitements selon ces profils.

Les simulations d'interception par les feuilles sont également sensibles à la **densité d'axes par m<sup>2</sup> du couvert**. Plus la densité d'axes est forte, plus l'interception par les feuilles diminue. Cela correspond à une « compétition entre les plantes » pour le produit. Cet effet s'observe aussi bien sur la feuille drapeau (Figure 29C) que sur les feuilles inférieures.

Les analyses de sensibilité montrent que des variations de l'architecture des blés liées à l'âge des plantes, ou bien au profil des surfaces foliaires ou encore de la densité des axes du couvert changent les quantités de produit interceptées par les feuilles. Parmi les 3 facteurs testés dans ce travail, c'est l'effet de l'âge des plantes au moment du traitement qui est le plus fort, puis c'est la dimension des feuilles et enfin le nombre d'axes par m<sup>2</sup> en terme d'effet sur l'interception des fongicides par les feuilles. Prendre en compte ces effets peut aider à optimiser les dates de traitement ou encore la densité de semis pour maximiser l'interception sur les feuilles cibles. Le modèle réalisé dans le projet en permettant de caractériser l'effet des différents facteurs d'architecture pourrait y participer. Il est à noter cependant que les phénomènes de compensation d'axes par le tallage, important lors de blés plantés à des densités de semis faibles vont atténuer l'effet de la densité de semis au moment des traitements.

### **III5b. Identifier par simulation les dates de traitement et les traits d'architectures maximisant la protection**

**Méthode d'estimation de l'efficacité de protection.** Dans cette partie, les modèles développés durant le projet sont utilisés pour raisonner des optimalités de traitements sur un cas d'étude. Dans cet exemple, 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 assurer la protection de la feuille drapeau. La variété utilisée est Tremie, saison 3.

La protection d'une feuille envers la maladie dépend non seulement 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. Mais, un dépôt réalisé peu avant le déclenchement de la sénescence de la feuille sera moins efficace qu'un dépôt réalisé plus tôt, car il n'est plus nécessaire de protéger une feuille morte et la durée de protection sera donc raccourcie. 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,  $q_d$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), calculée par le modèle d'interception, par la densité surfacique de produit,  $q_p$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) :

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

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

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

**Estimation de la date de traitement optimale.** L'efficacité associant interception et couverture de la feuille drapeau est une fonction croissante de la date de traitement (Figure 30A et B). Plus le traitement est tardif, plus l'interception et la couverture par la feuille est forte. Cette augmentation plafonne cependant environ 300 dd après son émergence. Ceci est à mettre en relation avec l'effet d'affaissement des feuilles avec l'âge, qui augmente leur exposition à un flux vertical. La prise en compte de la durée de protection fait apparaître une optimalité beaucoup plus stricte (Figure 30C). L'optimum d'application se situerait environ à la moitié de la durée de vie verte et le créneau optimal de traitement est centré sur quelques jours seulement.

Le raisonnement réalisé dans cet exemple, conduit pour différentes feuilles et différentes variétés permet de raisonner les optimums de date de traitement pour ces différents cas. Un des intérêts est de pouvoir (1) décider de la variable à optimiser (ici par exemple protection de la feuille drapeau, mais il est possible de sommer les différentes feuilles par exemple) et (2) comparer des variétés, voir identifier l'effet de traits d'architecture sur cet optimisation.

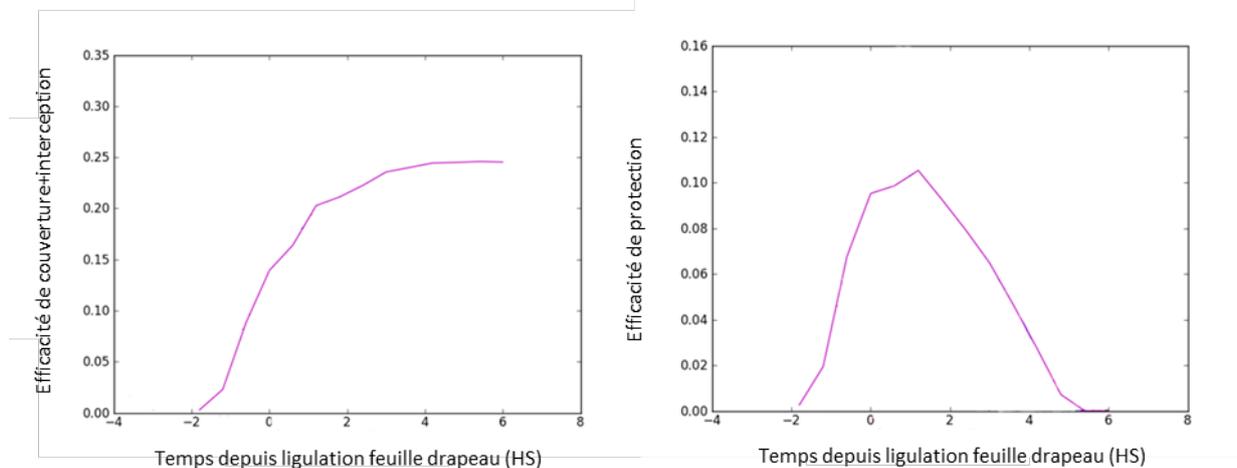


Figure 30 : Réponses à la date de traitement fongicide de l'efficacité d'interception fois l'efficacité de couverture (gauche), et de l'efficacité de protection (droite) pour la feuille drapeau de Trémie saison 3 de l'essai. Projet ECHAP 2010-2014.

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

*INRA-ECOSYS (C. Bedos, V. Pot, L. Mamy), Alterra (E. van den Berg)*

L'évaluation du bilan environnemental des différentes stratégies fongicides est basée sur l'utilisation de PRZM (version PRZM 3.21) et de PEARL (version PEARL 4.4.4). L'évaluation a été réalisée pour les couverts des expérimentations réalisées au champ à Boigneville du projet pour les 3 architectures

étudiées Rht3/Mercia/Tremie et pour les années climatiques 2010/2011 et 2011-2012. Deux fongicides parmi les plus utilisés dans les céréales ont été sélectionnés : l'époxyconazole (dose et date d'application utilisées à Boigneville) et le chlorothalonil (même si celui-ci n'a pas été utilisé à Boigneville) appliqué à la même date que l'époxyconazole et à une dose appliquée conforme à la dose homologuée (0.75 kg/ha).

Scénarios	Année	Traitement	Dose	Date de traitement
A1-T1-Mercia	2010-2011	T1	1	T1: 13/04/11
A1-T2-Mercia	2010-2011	T2	1	T2: 3 /05/11
A1-T1+T2-Mercia	2010-2011	T1+T2	1	
A1-T1+T2-D2-Mercia	2010-2011	T1+T2	0.5	
A1-T1-Rht3	2010-2011	T1	1	T1: 13/04/11
A1-T2-Rht3	2010-2011	T2	1	T2: 3 /05/11
A1-T1+T2-Rht3	2010-2011	T1+T2	1	
A1-T1+T2-D2-Rht3	2010-2011	T1+T2	0.5	
A2-T1_Trémie	2011-2012	T1	1	T1: 12/04/12
A2-T2_Trémie	2011-2012	T2	1	T2: 10/05/12
A2-T1+T2-D2_Trémie	2011-2012	T1+T2	0.5	
A2-T1+T2-D4_Trémie	2011-2012	T1+T2	0.25	
A1-T1_Trémie	2010-2011	T1	1	T1: 13/04/11
A1-T2_Trémie	2010-2011	T2	1	T2: 3 /05/11
A1-T1+T2_Trémie	2010-2011	T1+T2	1	
A1-T1+T2-D2_Trémie	2010-2011	T1+T2	0.5	

**Tableau 9** : Scénarios de simulation du bilan environnemental de chaque fongicide A1T1\_Mercia représente par exemple le traitement 1 appliqué en saison 1 sur la variété Mercia ; lorsque deux traitements ont été apportés, les mentions D2 et D4 représentent respectivement des traitements à demi dose et à quart dose.

Concernant le paramétrage de l'interception du fongicide par le couvert, nous l'avons considérée ici comme étant égale au taux de couverture de la culture de blé au moment de l'application pour PEARL (quant à PRZM, l'interception est calculée par le modèle à partir du taux d'interception maximum du couvert). Pour le devenir des produits sur la feuille, nous avons utilisé les coefficients de devenir sur la feuille obtenus lors des expérimentations en conditions contrôlées du projet (via des temps de demi-vie déduits de mesures de volatilisation, pénétration – cuticule+cellules- et photodégradation). PRZM ne simulant pas le processus de pénétration dans la feuille, nous avons forcé ce processus dans le modèle via le paramètre utilisé pour la dégradation sur la feuille, ces deux processus étant tout deux décrits selon une cinétique d'ordre 1. Pour chaque culture, les simulations sont réalisées du 1<sup>er</sup> sept au 31 août de chaque cycle, avec une année supplémentaire de « chauffe » du modèle pour pallier le manque d'information quant à la teneur initiale en eau du sol. En croisant les 3 architectures, les dates de traitements (en négligeant l'effet du volume de bouillie apportée - facteur non significatif au vue des expérimentations du projet), 16 scénarios (Tableau 9) ont été construits incluant un test pour étudier l'effet année (variété Trémie étudiée en saisons 1 et 2).

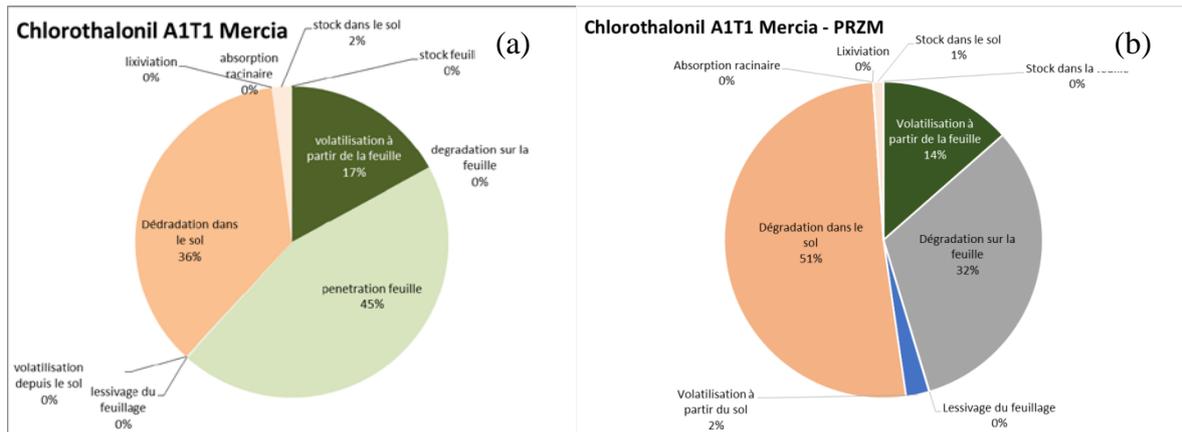
Nous avons sélectionné les **critères environnementaux** suivants :

- 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

### **Cas du chlorothalonil**

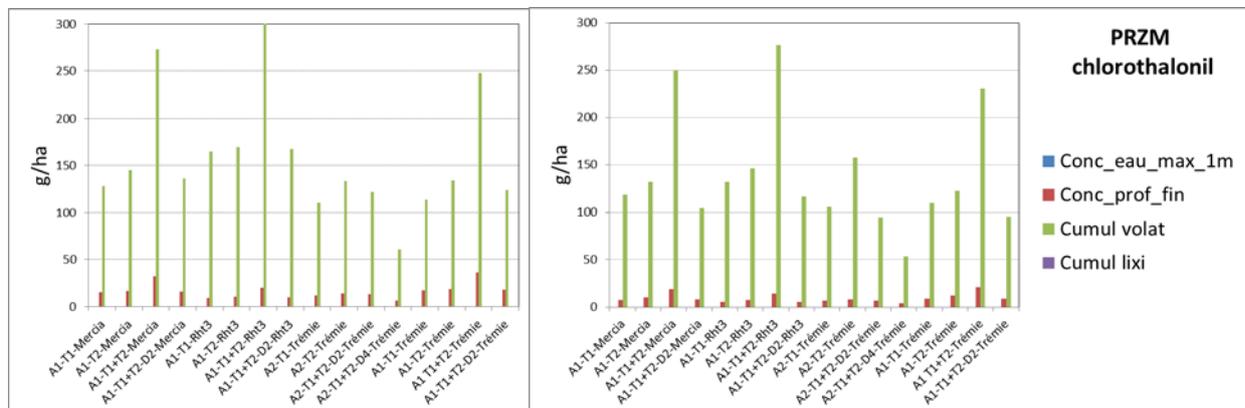
**Bilan de masse.** La figure 31 présente le bilan de masse en fin de simulation pour le cas de Mercia en saison 1 et pour le 1<sup>er</sup> traitement simulé par PEARL et PRZM. Le bilan de masse se répartit globalement entre la volatilisation depuis la feuille, la pénétration dans la feuille (dégradation sur la feuille pour PRZM car celui-ci n'intègre pas le processus de pénétration foliaire dans ses équations) et la dégradation dans le sol. Aucun des deux modèles n'identifie de lixiviation du chlorothalonil à un mètre de profondeur dans le sol. Cette tendance ici illustrée pour un scénario est globalement retrouvée quelque soit le scénario. En termes de volatilisation totale (sol + feuille), les pertes calculées

sont similaires et significatives pour les deux modèles (16% et 18% de la dose apportée en moyenne pour tous les scénarios pour PRZM et PEARL). Ces quantités sont un peu plus élevées que celles observées au champ (de l'ordre de 4.9% perdus en une semaine pour du chlorothalonil appliqué sur des pommes de terre (van den Berg et al., 1995) ou 2.1% pour une application sur blé (Bedos et al. 2010), peut être en lien avec le fait que les paramètres utilisés en entrée des modèles ont été obtenus en conditions contrôlées avec un écoulement d'air permanent. Enfin, le stock dans le sol en fin de simulation (i.e. 5 mois environ après l'application) est du même ordre de grandeur pour les deux modèles quoique systématiquement plus élevé dans PEARL (1.3 et 2.2% pour PRZM et PEARL).



**Figure 31** Bilan de masse en fin de simulation : cas du chlorothalonil dans le scénario A1T1 Mercia simulé par PEARL (a) et par PRZM (la mention « dégradation sur la feuille » représentant en fait la pénétration dans la feuille, le temps de demi-vie utilisé étant celui obtenu pour la pénétration) (b). Projet ECHAP 2010-2014.

**Effet scénario.** Parmi les critères environnementaux sélectionnés, seules les pertes cumulées par volatilisaison et le stock dans le sol en fin de simulation donnent lieu à une quantification, la concentration dans l'eau du sol à 1m et les pertes par lixiviation étant nulles (figure 32). Des différences sont observées portant sur des effets de a) la quantité apportée: deux traitements à pleine dose engendrent des pertes cumulées par volatilisaison et un stock dans le sol environ deux fois plus élevés qu'un seul traitement, b) climat : la comparaison du scénario avec la variété Trémie simulée en années 1 et 2 montrent une variation de stock dans le sol de l'ordre de 20 à 30% entre les années 1 et 2 et peu d'effet sur les pertes par volatilisaison et c) architecture, en lien le niveau d'interception, notamment pour les pertes par volatilisaison (en lien avec une contribution de la volatilisaison depuis la plante très supérieure à celle depuis le sol).

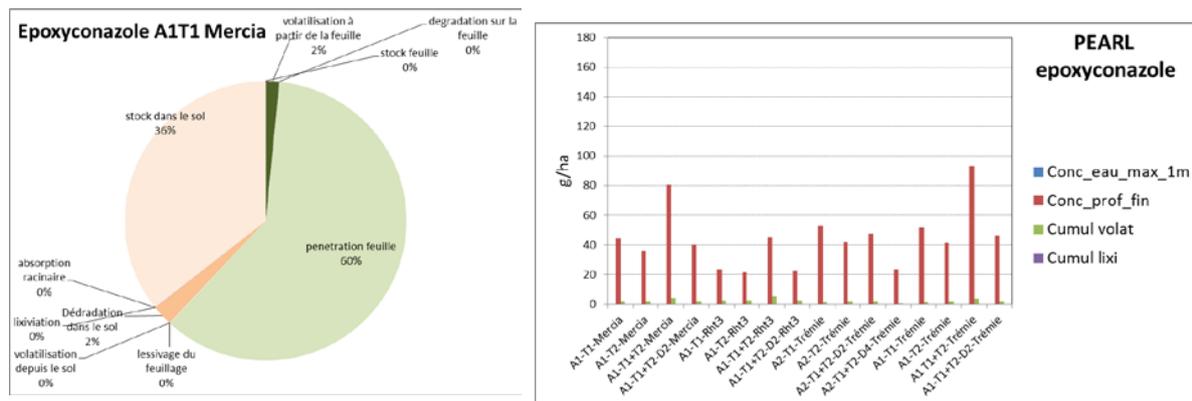


**Figure 32** : Quatre critères environnementaux calculés par PEARL (gauche) et PRZM (droite) pour le chlorothalonil pour les 16 scénarios étudiés (tableau 9). Projet ECHAP 2010-2014.

**Cas de l'époxiconazole**

Le modèle PEARL étant plus adapté pour décrire les processus ayant lieu dans le feuillage et les résultats fournis par PEARL et PRZM étant cohérents, seul PEARL a été retenu pour estimer les impacts environnementaux liés à l'époxyconazole. Le bilan de masse en fin de simulation montre une distribution quelque peu différente de celle du chlorothalonil, avec essentiellement les compartiments pénétration dans la feuille et dégradation dans le sol, en lien avec le caractère moins volatil de cette molécule comparé à celle du chlorothalonil. Par ailleurs, c'est un fongicide systémique dont la pénétration foliaire est attendue.

Ainsi, parmi les critères environnementaux sélectionnés, seul le critère « stock dans le sol » en fin de simulation est vraiment quantifiable. Un effet scénario peut aussi être observé avec toujours l'effet dose en termes de quantité, ainsi que l'effet architecture en lien avec le taux d'interception qui module la quantité de composés atteignant le sol.



**Figure 33** Bilan de masse en fin de simulation : cas de l'époxyconazole dans le scénario A1 (saison 1) T1 (date d'application 1) lignée Mercia simulé par PEARL (gauche) et Critères environnementaux calculés par PEARL pour l'époxyconazole pour les 16 scénarios (droite). Projet ECHAP 2010-2014.

En conclusion, les molécules ici étudiées ne sont pas lixiviées en profondeur en raison d'une durée de simulation courte (seulement 6 mois après l'application) et du fait de capacités de rétention élevées pour ces deux molécules. Pour mieux évaluer le critère environnemental sur la lixiviation dans le sol, il faudrait réaliser des simulations de plus longues durées en particulier pour l'époxyconazole qui est une molécule persistante (DT50 = 226 jours) par rapport au chlorothalonil (DT50 = 15.7 jours). Cependant il est à noter que les modèles utilisés ne comprennent pas certains processus comme les transferts colloïdaux qui pourraient contribuer à une migration en profondeur de ces molécules. Les pertes par volatilisation sont significatives pour le chlorothalonil, à mettre en regard avec des évaluations par des modèles mécanistes dédiés à la description de la volatilisation depuis le feuillage. 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.

#### IV. Conclusions : Résultats majeures, opérationnalité et 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.

##### IV.1 Résultats majeurs du projet

Quatre types de résultats majeurs émergent du projet ECHAP :

(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 après application. 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 réussi le challenge du développement d'un modèle, **au sein d'un groupe interdisciplinaire**, qui prend en compte les interactions entre l'architecture des couverts, le développement de la septoriose et le fongicide appliqué. La gestion de la pluridisciplinarité c'est faite au travers de sessions de travail régulières et pluri-disciplinaire qui ont permis de mettre en place et d'associer les différentes composantes du modèle. Ce travail valide pour la première fois la méthodologie de couplage proposée par la plateforme OpenAlea pour la réalisation de modèle interdisciplinaire. **Ce modèle, innovant et original, 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 (autour de 300 dd post ligulation pour la variété Tremie et le climat de l'année 2012-2013). 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 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 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 surtout 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. Des études supplémentaires sont nécessaires afin de prendre en compte la protection des feuilles 2 et 3 dans le calcul d'optimisation.

(4) Enfin, notre projet propose des outils de modélisation pour l'évaluation multicritère des stratégies. Des critères de type agronomique (rendement), sont associés à des critères épidémiologiques (AUDPC), des critères de durée de vie des produits et enfin d'impact environnemental. Ainsi, 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. Des indicateurs variés pour l'évaluation multicritère des stratégies ont ainsi été proposés. Cependant, la durée du projet n'a pas permis de tester ces outils d'évaluation ni de les mettre en regard pour analyser et comparer des stratégies de traitement. C'est une des perspectives importantes de ce travail.

En conclusion, le projet ECHAP a permis d'acquérir des connaissances ce qui a permis de lever des verrous pour la compréhension du système et de développer un modèle à l'échelle de la parcelle qui

simule l'effet de stratégies de traitements fongicide en fonction de l'architecture des couverts. Le développement d'une boîte à outil logiciel avec les différentes composantes du système a été réalisé et a abouti au modèle Septo3DFongi. Le modèle a été testé avec les expérimentations de terrain du projet. Des indicateurs variés pour l'évaluation multicritère des stratégies ont été proposés. Cependant, la durée limitée du projet n'a pas permis de tester ces outils d'évaluation ni de les mettre en regard pour analyser et comparer des stratégies de traitement. C'est une des perspectives importantes de ce travail.

## IV.2 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. Dans l'étude, une des hypothèses initiale était que le volume de bouillie aurait pu influencer le dépôt. En effet, les faibles volumes (< 50 l/ha), sont associés à l'utilisation de buses de petits calibres qui produisent des gouttelettes fines. Le risque dans ce cas, est une dérive accrue du produit. Les volumes hauts (> 200 L/ha) pourraient au contraire augmenter le ruissellement sur les feuilles. Or, dans les expérimentations réalisées sur 3 années, aucune différence significative de rétention de produit n'a été observée entre les 4 volumes testés (40 L/ha, 80 L/ha, 150 L/ha, 200 L/ha). C'est un résultat important 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 un certain nombre de 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. Nous avons identifié 4 pistes de perspectives vers l'opérationnalité que nous présentons ci-dessous.

### 1 Développer un simulateur opérationnel et validé des stratégies de traitement fongicide.

Le projet a abouti au développement d'un prototype fonctionnel et a 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. Le modèle a été validé sur un jeu de données issu de 3 années d'expérimentation.

Ce modèle pourra être utilisé pour évaluer in silico une grande variabilité de stratégies de traitements, mais deux points cruciaux requièrent un travail significatif 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 et sur d'autres architectures de blé. Ceci nécessiterait un projet mêlant ingénierie informatique, tests avec des utilisateurs, et des expérimentations de "stratégies de traitement" multilocales et pluriannuelles dans un réseau conséquent.

Le simulateur ainsi validé et simplifié permettra d'optimiser l'efficacité des traitements des variétés utilisées classiquement dans différentes régions, et de proposer des stratégies de traitements plus économes en fongicides. Cette perspective est d'autant plus importante que les résultats expérimentaux du projet montrent une interception des produits par les plantes assez faible et avec donc une possibilité d'amélioration importante.

### 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. Ce sont des analyses primordiales 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 également à développer pour permettre d'aboutir plus rapidement à de l'opérationnalité sur le terrain. L'idée est de s'appuyer sur la diversité architecturale des blés mondiaux existante, car celle-ci s'avère riche. Deux exemples attirent l'attention. Le gène Tin (initialement identifiés dans des blés de pays maghrebins) permet de faire varier à la baisse le tallage des blés, et est actuellement en phase avancée d'introgression dans les blés de printemps australiens en vue de créer des variétés mieux adaptés aux climats très secs. Egalement, des gènes Rht alternatifs existent, aboutissant à des blés demi-nains, comme ceux actuellement cultivés, mais en raccourcissant non pas les premiers entre-noeuds, mais les derniers. Ceux-ci sont également en phase avancée d'introgression en Australie, pour valoriser leur vigueur précoce dans les systèmes de culture d'agriculture de conservation. Il n'est pas garanti que ces exemples de variations soient pertinents pour aboutir à des blés intéressants pour l'agriculture d'aujourd'hui, mais on peut faire l'hypothèse qu'ils le soient. Tester ces nouveaux blés "expérimentalement" nécessiteraient 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 résultats 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 de notre approche à d'autres pathosystèmes et 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 (Thèse de G. Garin, INRA-itk, en cours). Une fois fini, le modèle ECHAP permettra de tester les stratégies fongicides non plus sur une des maladies du complexe mais en le considérant dans son entier. Il est également possible, en s'inspirant des travaux de Burie et al, (2011), d'utiliser septo3DFongi, qui travaille à l'échelle de la parcelle, pour paramétrer des modèles plus simple opérant à l'échelle du paysage et ainsi parvenir à estimer des impacts à plus large échelle.

## **IV. 3 Actions de transfert de connaissance ou de valorisation**

Les travaux du projet ECHAP ont été présentés 10 fois lors de colloques nationaux et internationaux depuis 2012. Il s'agit de colloques scientifiques, mais également de conférences plus orientées vers la vulgarisation. Une présentation du projet et des résultats est notamment prévue en mai 2015 lors du 45ième congrès du Groupe Français des Pesticides (GFP) ainsi qu'au Pesticide Symposium on Pesticide Chemistry "Environmental Risk Assessment and Management" (septembre 2015, Piacenza) pour la partie *évaluation environnementale*.

De plus, des publications scientifiques ont été réalisées et sont en cours de réalisation sur les différents axes développés dans le projet. La thèse de N. Lichiheb est également terminée et présente les travaux développés sur le devenir des fongicides sur les feuilles (une publication est soumise sur ce volet).

De façon plus large, certains résultats du projet ont été publiés dans des journaux du monde agricole tels que « Perspective Agricole » et « France Agricole ». Le projet ECHAP a également été retenu comme Fait Marquant du département Environnement et Agronomie, pour l'année 2014 et il bénéficie pour cela d'une présentation spécifique sur le site WEB de l'INRA. Un article sur le projet est également en cours de rédaction dans la Lettre aux Entreprises de l'INRA et va être publié en automne sur le site internet de l'INRA.

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.

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). Au sein de ARVALIS, les résultats de l'expérimentation de terrain du projet ont été présentés lors des journées Résultat à Paris (octobre 2014) de l'institut et ils ont été repris par des acteurs régionaux lors de leurs communications d'automne. Certains des résultats du projet ont également vont être intégrés dans les formations "pulvé" ou interventions "bas volumes" de Benjamin Perriot (ARVALIS, Boignevilles).

Enfin, 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 ainsi 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.

## Références

- Ando K, R. Grumet, K. Terpstra and J. D. Kelly. 2005. Manipulation of plant architecture to enhance crop disease control. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 2007 2, No. 026
- Aries, F., L. Prevo, and P. Monestiez. 1993. Geometrical canopy modelling in radiation simulation studies. In Crop structure and light microclimate : characterization and applications, edited by C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet. Paris: INRA editions.
- Aubertot, J.N., J.M. Barbier, A. Carpentier, J.J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, and M. Voltz. - 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux.. Expertise Scientifique Collective INRA/CEMAGREF.
- Bahat, A., I Gelernter, M.B. Brown and Z. Eyal (1980) Factors affecting the vertical progression of Septoria Leaf Blotch in Short-Statured Wheats. Phytopathology 70 (3): 179-184
- Bancal, M-O., Robert, C., Ney, B 2007. Modelling wheat growth and yield losses from late epidemics of foliar diseases using loss of green leaf area per layer and pre-anthesis reserves. Annals of Botany. 2007 : 777-789
- Barillot, Romain, Abraham J. Escobar-Gutiérrez, Christian Fournier, Pierre Huynh, and Didier Combes. 2014. Assessing the effects of architectural variations on light partitioning within virtual wheat-pea mixtures. Annals of Botany 114 (4):725-737.
- Bedos, C., M.F. Rousseau-Djabri, B. Loubet, B. Durand, D. Flura, O. Briand, and E. Barriuso. 2010. Fungicide Volatilization Measurements: Inverse Modeling, Role of Vapor Pressure, and State of Foliar Residue. Environ. Sci. Technol. 44: 2522-2528.
- Bentson, K.P. 1990. Fate of xenobiotics in foliar pesticide deposits. Reviews Environ. Contam. Toxicol., 114, 125-161.
- Brunet, N., L. Guichard, B. Omon, N. Pingault, E. Pleyber and A. Seiler. (2008) L'indicateur de fréquence de traitements (IFT) : un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n° 56 (déc) : 13-23
- Burie J.B., M. Langlais, and A. Calonnec . Switching from a mechanistic model to a continuous model to study at different scales the effect of vine growth on the dynamic of a powdery mildew epidemic. Ann Bot (2011) 107 (5): 885-895
- Calonnec, A., Burie, J.-B., Langlais, M., Guyader, S., Saint-Jean, S., Sache, I., Tivoli, B., 2013. Impacts of plant growth and architecture on pathogen processes and their consequences for epidemic behaviour. Eur J Plant Pathol 135, 479-497. doi:10.1007/s10658-012-0111-5
- Carsel R.F., Imhoff J.C., Hummel P.R., Cheplick J.M., Donigan A.S.Jr., 1998. PRZM 3, a model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: Users manual for release 3.12. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environment Protection Agency.
- Chelle M., Andrieu B., Bouatouch K. – 1998 - Nested radiosity for plant canopies. The Visual Computer, 14:109-125
- Chelle M., Hanan J., Autret H. – 2004 – Lighting virtual crops : the CARIBU solution for open L-systems. In: 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier,

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

- de Ruiter H., Kempenaar C., Blom G., 2004. Foliar absorption of crop protection agents : influence of CPA properties, formulation and plant species. Report 77, Plant Research international, Wageningen.
- Cordery I., Graham A.G., Forecasting wheat yields using a water budgeting model, Aust. J. Agric. Res. 40 (1989) 715-728.
- España, M.L., F. Baret, M. Chelle, F. Aries, and B. Andrieu. 1998. A dynamic model of 3D architecture: application to the parameterisation of the clumpiness of the canopy. *Agronomie* 18:609-626.
- España, M.L., F. Baret, F. Aries, and B. Andrieu. 1999. Sensitivity of radiative transfer variables calculation to the accuracy of canopy structure description. The case of maize canopy as described by a 3D architecture model. *Agronomie* 19:241-254.
- Evers, J.B. 2006. Tillering in spring wheat: a 3D virtual plant modelling study. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.
- Eyal, Z. 1971. The kinetics of pycnidiospore liberation in *Septoria tritici*. *Can. J. Bot.*, 49: 1095-1099
- Fournier, C., and B. Andrieu. 1999. ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability. *Agronomie* (19):313-327.
- Fournier C., Andrieu B., Ljutovac S. & Saint-Jean S. 2003. ADEL-wheat: a 3D architectural model of wheat development. In: *Plant Growth Modeling and Applications* (eds B.-G. Hu & M. Jaeger), pp. 54-66. Tsinghua University Press and Springer, Beijing, China
- Henriet, F. Deloy, S., Pigeon, O. and Moreau, J.M., 2005. Fate of epoxiconazole and kresoxim-methyl in wheat according to time of application. *Communications in agricultural and Applied Biological Sciences*, 70 (4), 1013-1022.
- Hobbelen PHF, Paveley ND, van den Bosch F (2014) The Emergence of Resistance to Fungicides. *PLoS ONE* 9(3): e91910. doi:10.1371/journal.pone.0091910
- Huber, L., Madden, L.V., Fitt, B.D.L., 2006. Environmental biophysics applied to the dispersal of fungal spores by rain-splash, in: Cooke, B.M., Gareth, D.G., Kaye, B. (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer, pp. 348-370.
- Katagi T (2004) Photodegradation of pesticides on plant and soil surfaces. *Rev Environ Contam Toxicol* 182: 1-189.
- Leistra, M., van der Linden, A.M.A., Boesten, J.J.T.I., Tiktak, A. and van den Berg, F., 2001. PEARL model pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems; Descriptions of the processes in FOCUS PEARL v 1.1.1. Alterra- report 013, ISSN 1566-7197, RIVM report 711401 009, Alterra RIVM, Wageningen, 115p.
- Leistra, M. 2005. Estimating input data for computations on the volatilisation of pesticides from plant canopies and competing processes. *Alterra report* 1256
- Leistra, M., and F. van den Berg. 2007. Volatilization of Parathion and Chlorothalonil from a Potato Crop Simulated by the PEARL Model. *Environ. Sci. Technol.* 41: 2243-2248.
- Louarn, G., Chenu, K., Fournier, C., Andrieu, B., Giauffret, C. 2008. Relative contributions of light interception and radiation use efficiency to the reduction of maize productivity under cold temperatures. *Functional Plant Biology* 35 (9/10):885-899.
- Lovell, D.J., Parker, S.R., Hunter, T., Royle, D.J. and Coker, R.R., 1997. Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology*, 46(1): 126-138.
- Lovell, D.J., Parker, S.R., Hunter, T., Welham, S.J. and Nichols, A.R., 2004. Position of inoculum in the canopy affects the risk of septoria tritici blotch epidemics in winter wheat. *Plant Pathology*, 53(1): 11-21
- Lovell, D., S.R. Parker, N.D. Paveley, and A.J. Worland (2002) Understanding field resistance mechanisms for improved control of *Septoria tritici*. *Proceeding of 6th Conference of European Foundation for Plant Pathology*. Eds: Taborsky, V, Polak, J ; Lebeda, A; Kudela, V. Prague, Czech Republic : Institute of Agricultural and Food Information.
- Madden L.V., G. Hughes, and F. van den Bosch, *The Study of Plant Disease Epidemics*, APS Press, St. Paul (2007).
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London Series B* 281:277-294.
- 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) p 997-1013.
- Rolland, B., C. Bouchard, C. Loyce, J-M Meynard, H. Guyomard, P. Lonnet and G. Doussinault. (2003). Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre: une alternative pour concilier économie et environnement. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n° 49 (juin): 47-62
- Saint Jean, S., Chelle, M. and Huber, L., 2004. Modeling water transfer by rain splash in a 3D canopy structure by means of Monte Carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(3-4): 183-196
- Saint-Jean S., A. Testa, L. V. Madden, et L. Huber. Relationship between pathogen splash dispersal gradient and Weber number of impacting drop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4):257-262, 2006.
- Satchivi, N.M., Stoller, E.W., Wax, L.M. and Briskin, D.P., 2000. A Nonlinear Dynamic Simulation Model for Xenobiotic Transport and Whole Plant Allocation Following Foliar Application I. *Conceptual Foundation for Model Development*, 2 Pesticide Biochemistry and Physiology **68**, 67-84.
- Satchivi, N.M., Stoller, E.W., Wax, L.M. and Briskin, D.P., 2006. A nonlinear, dynamic, simulation model for transport, and whole plant allocation of systemic xenobiotics following foliar application. IV: Physicochemical

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

- properties requirements for optimum absorption and translocation Pesticide Biochemistry and Physiology 84, 83-97.
- Scholtz, M.T., Voldner, E., McMillan, A.C. and Van Heyst, B.J., 2002. A pesticide emission model (PEM) Part I: model development. Atmospheric Environment 36, 5005-5013.
- Schreiber L, Schorn K, Heimbürg T (1997) <sup>2</sup>H NMR study of cuticular wax isolated from *Hordeum vulgare* L. leaves: identification of amorphous and crystalline wax phases 38. European Biophysics Journal 26: 371-380.
- Shaw, M.W. and D.J. Royle. 1993. Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat in the UK. Plant Pathol. 42:882-899
- Ter Halle, A., Drncova, D., Richard, C., 2006. Phototransformation of the herbicide sulcotrione on maize cuticular wax. Environ. Sci. Technol. 40, 2989-2995.
- van den Berg, F., Kubiak, R., Benjey, W.G., Majewski, M.S., Yates, S.R., Reeves, G.L., Smelt, J.H. and van der Linden, A.M.A., 1999. Emission of pesticides into the air. Water, Air, and Soil Pollution 115, 195-218.
- van den Berg, F., Bedos, C. and Leistra, M. - 2008. Volatilisation of pesticides computed with the PEARL model for different initial distributions within the crop canopy, International Advances in Pesticide Application. Association of Applied Biology, Cambridge (UK), 131-138.
- Willis & McDowell, 1987. Pesticide persistence on foliage. Reviews Environ. Contam. Toxicol. 100, 23-73
- Xu, L., H. Zhu, H.E. Ozkan, W.E. Bagley, and C.R. Krause. 2011. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants. Pest Management Science 67: 842-851.

**Annexe : partie confidentielle**

*Vous pouvez insérer ici toute information ou résultat qui revêt une part de confidentialité.*

*Merci de préciser le degré de confidentialité de ces données.*

*Nous vous recommandons de préciser dans la partie non confidentielle l'existence de ces données confidentielle et d'expliquer la raison de leur confidentialité.*

*Cette partie ne sera pas diffusée sur le site Internet du Ministère.*

*Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).*

*Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.*