



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

UFR Sciences
2, boulevard Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01

AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuç, CS 84 215, BP
35042 - RENNES Cedex
Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor, CS 46510
35065 RENNES Cedex

IRDA
335 chemin des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville
J3V 0G7 Canada (QC)

Mémoire de fin d'études

Master 2 Sciences, Technologies, Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : Productions Végétales Spécialisées (PVS)
Option : Filières de l'horticulture et du végétal urbain

Année universitaire 2012-2013

**Lutte chimique contre la tavelure du pommier :
efficacité de différents fongicides et stratégies de traitements**

Par Arnaud Baudin

Maître de stage : **Vincent Phillon**, Chercheur en phytopathologie (IRDA)

Soutenu à Angers le 13 septembre 2013

Devant le jury :

Enseignant référent : **Alexandre Degrave**, Enseignant-chercheur (AgroCampus Ouest)
Responsable du parcours : **Sandrine Travier**, Enseignant-chercheur (Université d'Angers)
Responsable de l'option : **Mickaël Delaire**, Enseignant-chercheur (AgroCampus Ouest)
Autre membre du jury : **Tristan Boureau**, Enseignant-chercheur (Université d'Angers)



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

UFR Sciences
2, boulevard Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01

AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuç, CS 84 215, BP
35042 - RENNES Cedex
Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor, CS 46510
35065 RENNES Cedex

IRDA
335 chemin des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville
J3V 0G7 Canada (QC)

Mémoire de fin d'études

Master 2 Sciences, Technologies, Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : Productions Végétales Spécialisées (PVS)
Option : Filières de l'horticulture et du végétal urbain

Année universitaire 2012-2013

**Lutte chimique contre la tavelure du pommier :
efficacité de différents fongicides et stratégies de traitements**

Par Arnaud Baudin

Maître de stage : **Vincent Philion**, Chercheur en phytopathologie (IRDA)

Soutenu à Angers le 13 septembre 2013

Devant le jury :

Enseignant référent : **Alexandre Degrave**, Enseignant-chercheur (AgroCampus Ouest)
Responsable du parcours : **Sandrine Travier**, Enseignant-chercheur (Université d'Angers)
Responsable de l'option : **Mickaël Delaire**, Enseignant-chercheur (AgroCampus Ouest)
Autre membre du jury : **Tristan Boureau**, Enseignant-chercheur (Université d'Angers)

AUTORISATION DE DIFFUSION EN LIGNE

I ÉTUDIANT(E)

N   tudiant : 20103613 Email : arnaud.baudin@gmail.comJe soussigné(e) Arnaud Baudin être l'auteur du document intitul Lutte chimique contre la tavelure du pommier : efficacité de différents fongicides et stratégies de traitementspr par  sous la direction de Vincent Philionet soutenu le 13 septembre 2013

Je certifie la conformité de la version électronique déposée avec l'exemplaire imprimé remis au jury, certifie que les documents non libres de droits figurant dans mon mémoire seront signalés par mes soins et pourront être retirés de la version qui sera diffusée en ligne par le Service Commun de la Documentation de l'Université d'Angers. Agissant en l'absence de toute contrainte, et sachant que je dispose à tout moment d'un droit de retrait de mes travaux, j'autorise, sans limitation de temps, l'Université d'Angers à les diffuser sur internet dans les conditions suivantes :

- | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> diffusion immédiate du document en texte intégral
<input type="checkbox"/> diffusion différée du document en texte intégral ; date de mise en ligne :
<input type="checkbox"/> n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

  Angers, le 13 septembre 2013 Signature :

II JURY DE SOUTENANCE

- | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> autorise la diffusion immédiate du document en texte intégral
<i>OU</i>
<input type="checkbox"/> autorise la diffusion différée du document en texte intégral ; à compter du :
<input type="checkbox"/> en libre-accès <i>OU</i> <input type="checkbox"/> en accès restreint
<input type="checkbox"/> sous réserve de corrections
<input type="checkbox"/> autorisation du maître de stage requise ¹ à Nom et signature du maître de stage : |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

OU

- | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|

  Angers, le----- Signature :

¹ à l'issue de la soutenance, le présent formulaire est transmis à la bibliothèque universitaire et une copie certifiée conforme est remise à l'étudiant, qui devra la retourner à la bibliothèque une fois celle-ci signée par son maître de stage.



**ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT
M2 PROTeV
2012-2013**

Je, soussigné (e) : **Arnaud Baudin**
.....

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour ce rapport, rédigé au cours de mon master 2 ProTeV. Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : **Saint-Bruno-de-Montarville (Canada, QC)**

Le : **26 août 2013**

Signature :

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **Vincent Philion**, chercheur et maître de stage, pour m'avoir intégré au sein de son équipe de phytopathologie à l'IRDA. Son expertise en épidémiologie des maladies du pommier, sa vision de la recherche, et sa passion pour le logiciel R et les biostatistiques m'ont beaucoup apporté.

Un grand merci à **Valentin Joubert**, grand technicien de l'équipe phytopathologie. Tu as su trouver mon respect par ton expérience dans l'expérimentation fruitière, ta patience lors des fortes périodes d'activité, ta diplomatie pour transmettre les consignes à nous, les stagiaires, ta disponibilité, et tes encouragements et remarques particulièrement subtiles et utiles tout au long du stage et lors de la rédaction de ce rapport. Je te remercie aussi pour m'avoir fait découvrir ce plat national qu'est la poutine dès le premier jour de mon arrivée à l'IRDA. Merci à toi de m'avoir transporté dans ton char à cette époque de l'année où la neige et la sloche rendent un trajet en bicyclette particulièrement ardu. Et d'ailleurs, merci pour la bicyclette! Pour ta bonne humeur toujours au rendez-vous, pour tes jokes, pour ton amour du café français, et pour tout le reste, et surtout pour m'avoir accordé ta confiance, un grand merci à toi!

Je tiens aussi à remercier **Annie Fortin** et **Dominique Leclerc**, tous deux techniciens dans cette équipe de phytopathologie. Merci à toi Annie, pour ta bonne humeur, pour ton énergie et ta passion pour cette belle province. Un grand merci à toi, Dominique, pour m'avoir maintes fois accompagné à l'IRDA, pour ta rigueur dans ton travail, pour m'avoir transmis certaines de tes connaissances en biologie, et pour ta sincérité et ton intégrité.

Je remercie aussi **Alexandre Leca**, professionnel de recherche sur le point de devenir un chercheur émérite dans son domaine de prédilection. Merci à toi pour ta passion pour les gouttes d'eau qui se déposent sur les feuilles de pommiers et autres végétaux, pour le covoiturage en vaisseau Montana toujours assuré lors d'évènements pluvieux, pour ta personnalité riche et subtile, et pour ta disponibilité.

Merci à mes deux collègues stagiaires, **Clémence Dieudonné** et **Laurie Blanchemain**, pour leur soutien, leur collaboration, leurs rires et leur implication dans cette équipe.

Je n'oublie pas **Jocelyn Tardif**, technicien, et **Rosaire Boivin** et **Mariline Béliveau-Simoneau**, ouvriers. Tous les trois, vous savez prendre soin du verger pour le rendre si beau. Un merci particulier à toi Jocelyn, vrai Québécois, pour ton énergie, ta disponibilité même lorsque tu es particulièrement occupé, et pour ta vision du Québec et de la France.

J'ai aussi une pensée pour les autres équipes de recherche (entomologie et malherbologie), les autres chercheurs, les autres techniciens et les autres stagiaires qui ont tous participé à mon passage à l'IRDA et au Québec.

Je remercie **Alexandre Degrave**, enseignant chercheur à Agrocampus Ouest (France), pour m'avoir apporté des remarques pertinentes et utiles à la rédaction de ce rapport.

Enfin, comment ne pas te porter une attention spéciale à toi, **Mar2mar**, sans qui je ne me serais probablement pas lancé dans cette aventure au Québec. Merci à toi pour m'avoir rendu visite ici-même, et pour avoir su tenir la distance.

Merci donc à vous toutes et à vous tous pour avoir rendu ce stage passionnant, enrichissant et très agréable, et pour ce passage au Québec si bref mais qui restera gravé dans ma mémoire.

UN GRAND MERCI À VOUS !

Sommaire

Introduction.....	1
I. Matériel et méthodes	5
<i>I.1. Matériel végétal.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2. Matériel de traitement.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3. Traitements</i>	<i>6</i>
<i>I.4. Dispositif expérimental</i>	<i>8</i>
<i>I.5. Observations</i>	<i>9</i>
<i>I.6. Analyse des données</i>	<i>9</i>
II. Résultats.....	10
<i>II.1. Données climatiques mesurées.....</i>	<i>10</i>
<i>II.2. Simulations RIMpro pour les infections primaires</i>	<i>10</i>
<i>II.3. Dates de traitements</i>	<i>11</i>
<i>II.4. Observations des symptômes de tavelure sur feuilles</i>	<i>12</i>
<i>II.5. Comparaisons des traitements par stratégie</i>	<i>13</i>
<i>II.6. Autres comparaisons de traitements</i>	<i>15</i>
III. Discussion.....	16
<i>III.1. Aspects généraux.....</i>	<i>16</i>
<i>III.2. Prévisions RIMpro</i>	<i>16</i>
<i>III.3. Efficacité des stratégies de traitement.....</i>	<i>18</i>
<i>III.4. Efficacité des fongicides et autres produits.....</i>	<i>19</i>
<i>III.5. Prises de décision</i>	<i>22</i>
Conclusion	24
Bibliographie.....	25

Liste des abréviations

ARLA : Agence de Réglementation de la Lutte Antiparasitaire

DH : Degré-Heure

EPI : Équipements de Protection Individuelle

FRAC : Fungicide Resistance Action Committee

GML : General Model Linear

IRDA : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

LLS : Lime Sulphur

PFI : Production Fruitière Intégrée

PSI : Pound per Square Inch

Liste des annexes

ANNEXE I : STADES PHÉNOLOGIQUES DU POMMIER (D'APRÈS FLECKINGER)

Liste des illustrations

FIGURE 1 : SYMPTÔMES DE TAVELURE SUR FEUILLES (GAUCHE) ET SUR FRUITS (DROITE) (SOURCE IRDA)

FIGURE 2 : CYCLE DE DÉVELOPPEMENT DE LA TAVELURE DU POMMIER, MALADIE CAUSÉE PAR *VENTURIA INAEQUALIS* (AGRIOS G.N., 2005)

FIGURE 3 : COURBE DE MATURATION DES ASCOSPORES (EN CUMULATIF) EN FONCTION DE L'ACCUMULATION DE DEGRÉS-JOURS (GADOURY D. M. *ET AL.*, 1982)

FIGURE 4 : VUE D'ENSEMBLE DES SIMULATIONS RIMPRO DE LA PÉRIODE DU 19 AU 24 MAI 2013 AU VERGER DE SAINT-BRUNO-DE-MONTARVILLE (SOURCE IRDA)

FIGURE 5 : GRAPHIQUE RIMPRO MONTRANT LES RÉSIDUS DE TRAITEMENTS RÉALISÉS AVEC DU SOUFRE LES 14 ET 20 MAI 2013 (SOURCE IRDA)

FIGURE 6 : MATÉRIEL DE TRAITEMENT : CUVES, QUAD ET ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELS (SOURCE IRDA)

FIGURE 7 : POSITIONNEMENT DES TROIS PRINCIPALES STRATÉGIES DE TRAITEMENT POUR UNE INFECTION PRÉDITE PAR RIMPRO (SOURCE IRDA)

FIGURE 8 : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES MESURÉES AU VERGER DE SAINT-BRUNO-DE-MONTARVILLE ENTRE LE 1ER MAI ET LE 1ER JUILLET 2013 (SOURCE IRDA)

FIGURE 9 : SIMULATIONS RIMPRO RÉALISÉES POUR LA SAISON DES ÉJECTIONS PRIMAIRES DE 2013 AU VERGER DE SAINT-BRUNO-DE-MONTARVILLE (SOURCE IRDA)

FIGURE 10 : SIMULATIONS RIMPRO ENTRE LE 21 ET LE 27 MAI 2013, AVEC PLACEMENT DE BREAKPOINTS POUR FACILITER LA LECTURE DES VALEURS RIM (SOURCE IRDA)

FIGURE 11 : SIMULATIONS RIMPRO RÉALISÉES ENTRE LE 14 ET LE 22 MAI, AVEC LA COUVERTURE FONGIQUE RÉSIDUELLE (HALO GRIS) ET LA PÉRIODE D'EFFET CURATIF (FLÈCHE NOIRE) POUR LES TRAITEMENTS RÉALISÉS EN PROTECTION BIO (SOURCE IRDA)

FIGURE 12 : NUAGE DE POINTS REPRÉSENTANT LES OBSERVATIONS RÉALISÉES POUR CHAQUE TRAITEMENT. CHAQUE POINT REPRÉSENTE LA MOYENNE DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES OBSERVÉES SUR 15 POUSES PAR RÉPÉTITION.

FIGURE 13 : COMPARAISON DES MOYENNES (TEST TUKEY, GROUPES EN HAUT DU GRAPHIQUE) DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES SUR 15 POUSES POUR LES TRAITEMENTS A (TÉMOIN NON TRAITÉ), B (CAPTAN HALF, PROTECTION), C (PROGRAMME DE TRAITEMENT AVEC 3 FONGICIDES, PROTECTION), D (POLYRAM, PROTECTION), E (MOISTURIN, PROTECTION), ET F (MOISTURIN + NCC, PROTECTION).

FIGURE 14 : COMPARAISON DES MOYENNES (TEST TUKEY, GROUPES EN HAUT DU GRAPHIQUE) DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES SUR 15 POUSES POUR LES TRAITEMENTS A (TÉMOIN NON TRAITÉ), O (KUMULUS, PROTECTION BIO), Q (KUMULUS, GERMINATION), ET Z (BICARBONATE+SOUFRE, POST-INFECTION 200-400 DH)

FIGURE 15 : COMPARAISON DES MOYENNES (TEST TUKEY, GROUPES EN HAUT DU GRAPHIQUE) DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES SUR 15 POUSES POUR LES TRAITEMENTS A (TÉMOIN NON TRAITÉ), Q (KUMULUS, GERMINATION) ET R (LLS LOW, GERMINATION)

FIGURE 16 : COMPARAISON DES MOYENNES (TEST TUKEY, GROUPES EN HAUT DU GRAPHIQUE) DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES SUR 15 POUSES POUR LES TRAITEMENTS A (TÉMOIN NON TRAITÉ), ET LES TRAITEMENTS EFFECTUÉS EN POST-INFECTION 200-400 DH : AA (INSPIRE SUPER), AB (LLS HIGH), AC (FONTELIS), U (BICARBONATE HIGH), V (BICARBONATE), W (BICARBONATE+ADHERE), X (BICARBONATE+HUILE), Y (BICARBONATE+SOUFRE+KAOLIN) ET Z (BICARBONATE+SOUFRE)

FIGURE 17 : MOYENNES DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES POUR 15 POUSES POUR LES 4 RÉPÉTITIONS DES TRAITEMENTS Q (KUMULUS) ET R (LLS LOW)

FIGURE 18 : COMPARAISON DES MOYENNES (TEST TUKEY, GROUPES EN HAUT DU GRAPHIQUE) DU NOMBRE DE FEUILLES TAVELÉES SUR 15 POUSES POUR LES TRAITEMENTS BICARBONATE+SOUFRE AD (POST-INFECTION 400-600 DH), T (POST-INFECTION 0-200 DH) ET Z (POST-INFECTION 200-400 DH)

FIGURE 19 : SUCCESSION DE 3 SIMULATIONS RIMPRO RÉALISÉES (DE HAUT EN BAS) LE 15 MAI 2013 À 15H, 17H ET 22H (SOURCE IRDA)

FIGURE 20 : SIMULATIONS RIMPRO MONTRANT L'INFECTION DU 11 MAI 2013 ET L'ABSENCE DE FENÊTRE DE GERMINATION POUR CE CAS (SOURCE IRDA)

Introduction

La tavelure est la maladie qui provoque le plus de dégâts et de pertes économiques en vergers de pommiers (*Malus x domestica*). La commercialisation de fruits atteints est fortement limitée car la qualité du produit est altérée (Agrios G.N., 2005) : symptômes visibles sur le fruit, petits calibres, chutes prématurées, diminution de la durée de stockage.

Cette maladie peut se développer sur les feuilles et les fruits du pommier (Figure 1), plus rarement sur les tiges et les fleurs. Formées sur la face supérieure des **feuilles**, les lésions sont de couleur noir et peuvent rester isolées sous forme de tâches circulaires, ou fusionner pour recouvrir le limbe. Sur **fruits**, les symptômes sont également sous forme de tâches circulaires sombres, et peuvent parfois former des fissures.

L'organisme pathogène responsable de la tavelure est un Ascomycète, *Venturia inaequalis* (Figure 2). Ce champignon hiverne dans les feuilles mortes de la litière, sous forme de pseudothèces immatures (MacHardy W. E., 1996). Leur maturation est progressive, tout au long de la période hivernale. Les conditions climatiques à la fin de l'hiver et au printemps permettent d'achever la croissance des pseudothèces et des asques et ascospores qu'ils contiennent. Lors d'évènements pluvieux, les pseudothèces matures éjectent les ascospores qui sont transportées par le vent et qui se déposent sur les tissus verts sensibles du pommier. Les ascospores germent et pénètrent l'organe lorsque certaines conditions de température et d'humectation sont réunies. Ce sont les **infections primaires** qui ont lieu jusqu'à la fin juin. Le tube germinatif de l'ascospore perce la cuticule et le mycélium se développe entre la cuticule et les cellules de l'épiderme. Une grande quantité de conidies est alors produite (reproduction asexuée), provoquant la rupture de la cuticule et l'apparition de symptômes visibles. La pluie disperse les conidies vers les feuilles et les fruits situés à proximité (effet splash), et sur lesquels elles germent et provoquent les **infections secondaires**. Plusieurs cycles secondaires se déroulent durant l'été. Après la chute des feuilles infectées, le mycélium envahit les tissus internes de la feuille et forme les pseudothèces (reproduction sexuée) assurant ainsi la survie du champignon pendant l'hiver.

Une faible quantité d'ascospores peut donc engendrer une quantité importante de conidies (Smeesters E. *et al.*, 2001). Par conséquent, une stratégie de lutte efficace vise à **limiter les infections primaires**. Si la maladie est bien contrôlée durant cette période, peu d'interventions phytosanitaires seront nécessaires durant le reste de la saison.

Tableau I : classement des substances actives des fongicides homologués au Québec, selon leur mode d'action (ARLA, 2013; FRAC, 2013). En vert : les substances actives des fongicides utilisés dans cette étude.

Mode d'action	Site d'action	Groupe	Famille chimique	Nom commun
multi-site (contact)		inorganiques		cuivre (plusieurs formes)
				soufre (plusieurs formes)
		phthalimides		captane
				folpet
		dithiocarbamates		ferbame
				mancozèbe
				métirame
				thirame
				zirame
		chloronitriles		chlorothalonil
mitose et division cellulaire	assemblage de β -tubuline lors de la mitose	MBC-fongicides (Methy Benzimidazole Carbamates)	thiophanates	thiophanate-methyl
respiration	complexe II: succinate-déshydrogénase	SDHI (Succinate dehydrogenase Inhibitors)	pyrazole-4-carboxamides	fluxapyroxade
			pyridinyl-ethyl-benzamides	penthiopyrade
			pyridine-carboxamides	fluopyram
	complexe III: cytochrome bc1 (ubiquinol oxidase) sur le site Qo du gène <i>cyt b</i>	QoI-fongicides (Quinone outside Inhibitors)	oximino acetates	boscalide
découpleur de la phosphorylation oxydative		2,6-dinitro-anilines	kresoxim-methyl	fluaziname
synthèse d'acides aminés et de protéines	oxydation de groupes thiol de protéines		allyl sulfides	trifloxystrobine
	synthèse de méthionine (gène <i>cgs</i>) (supposé)	AP-fongicides (Anilino-Pyrimidines)	anilino-pyrimidines	poudre d'ail
synthèse des stérols de la membrane	C14- déméthylase de la synthèse des stérols (<i>erg11/cyp51</i>)	DMI-fongicides (DeMethylation Inhibitors) (SBI: Class I)	triazoles	cyprodinil
				pyrimethanil
				difenoconazole
			triazolinthiones	flusilazole
				propiconazole
				prothioconazole
synthèse des lipides et intégrité membranaire	perturbateurs microbien de la membrane plasmique	microbien	<i>Bacillus sp.</i> et les lipopetides fongicides produits	<i>Bacillus subtilis</i> (souche QST 713)
inconnu	perturbation de la membrane cellulaire (supposé)		guanidines	dodine

Pour atteindre cet objectif, plusieurs techniques sont actuellement utilisées ou en étude au Québec : application de fongicides, plantation de cultivars tolérants, broyage des feuilles tombées au sol et application d'urée pour accélérer la décomposition des feuilles mortes, utilisation de pathogènes et d'antagonistes tels que *Microsphaeropsis sp.* (Smeesters E. *et al.*, 2001).

Les conditions climatiques du Québec étant propices au développement du champignon, l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) mènent des projets d'expérimentation visant à lutter efficacement contre cette maladie, dans le cadre de la production fruitière intégrée (PFI). Certains programmes de recherche sont axés sur la **lutte chimique** et étudient l'efficacité de différents fongicides (nouvelles molécules et tests en vue d'homologation) et de différentes stratégies de traitement. Les fongicides testés doivent montrer une amélioration par rapport aux produits habituellement utilisés par les producteurs (toxicité moindre pour une même efficacité, ou efficacité supérieure).

Une des difficultés que rencontrent les producteurs est le choix des fongicides à utiliser. Il doit prendre en compte plusieurs paramètres : le coût, l'efficacité, la gestion de l'apparition de résistances, la toxicité vis-à-vis de l'applicateur et de l'environnement. Les formulations commerciales homologuées¹ au Canada pour lutter contre la tavelure du pommier contiennent une ou deux des 27 substances actives listées dans le Tableau I. La variabilité des sites d'action des fongicides uni-sites et l'utilisation possible de fongicides multi-sites devraient permettre de contrôler efficacement l'apparition de résistances (Brent K.J., 1995). Néanmoins, le coût et la toxicité des produits phytosanitaires contraignent le producteur à **limiter et optimiser les applications** tout en assurant une efficacité suffisante des traitements. **Quels sont les fongicides les plus efficaces, et quelle est la période optimale de traitement?**

La prise de décision (choix du fongicide et période de traitement) est facilitée par la connaissance de la relation hôte-pathogène, et par l'utilisation d'outils prévisionnels qui intègrent certains paramètres issus de ces connaissances. L'objectif est de limiter les infections primaires. Il est donc nécessaire de prévoir au mieux les éjections d'ascospores qui se déposeront sur le feuillage. Mais toutes les ascospores ne sont pas mûres en même temps. Leur maturité suit une « courbe de maturation » (Figure 3, page suivante), qui dépend de la température (cumul de degrés-jours en base 0 °C), et de l'humectation des feuilles au sol (Giraud M., 2009).

¹ La **réglementation des pesticides du Canada** est gérée par l'ARLA, Agence de Réglementation de la Lutte Antiparasitaire de Santé Canada. Cette agence est chargée notamment de délivrer des homologations à la suite d'une évaluation fondée sur des données scientifiques, afin de s'assurer que les risques sont acceptables.

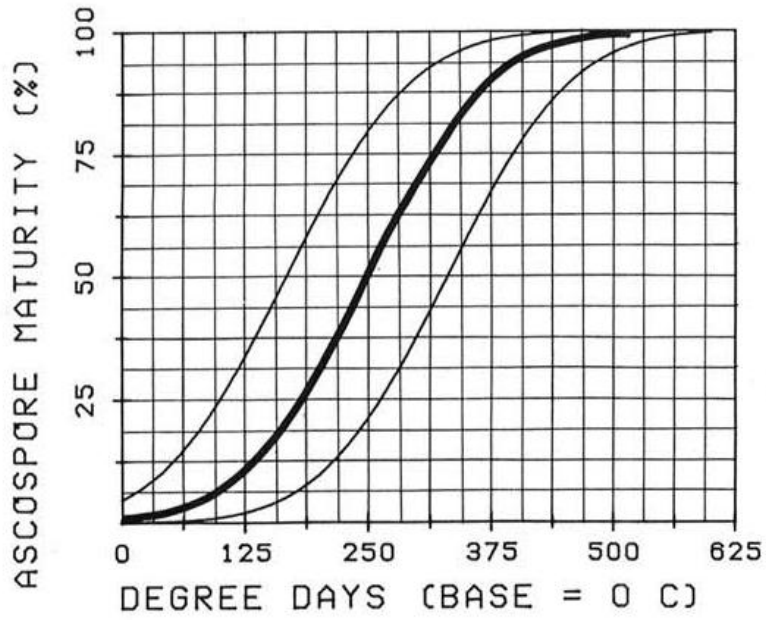


Figure 3 : Courbe de maturation des ascospores (en cumulatif) en fonction de l'accumulation de degrés-jours (Gadoury D. M. *et al.*, 1982)

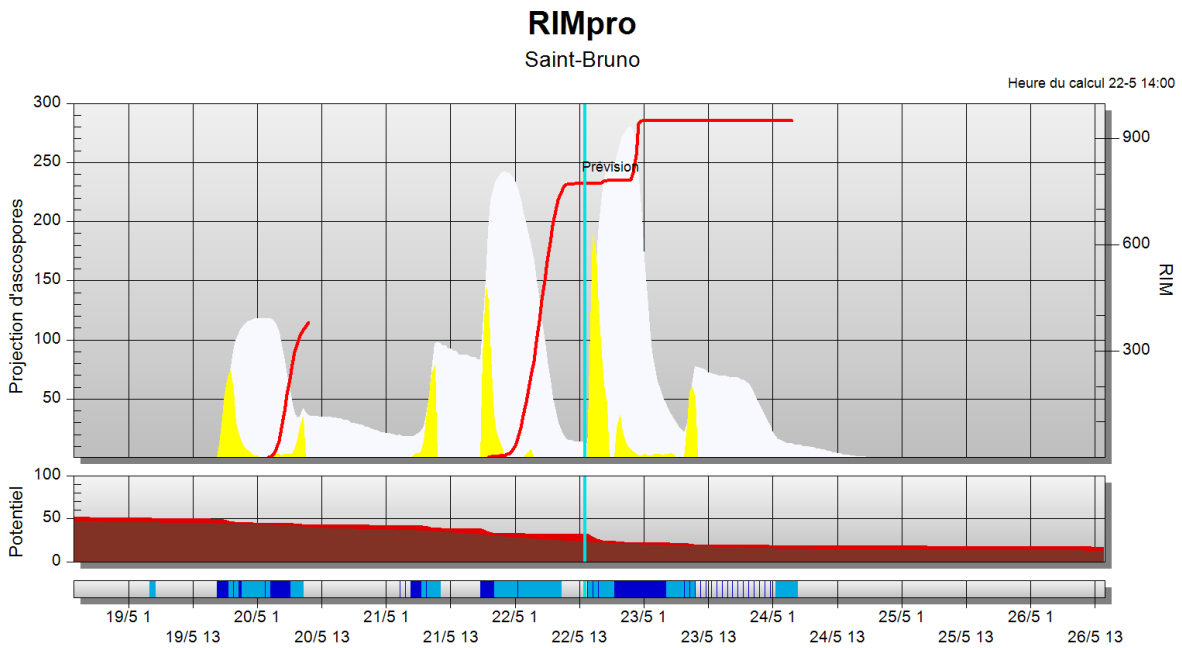


Figure 4 : Vue d'ensemble des simulations RIMpro de la période du 19 au 24 mai 2013 au verger de Saint-Bruno-de-Montarville (source IRDA)

A ces conditions de maturité des ascospores s'ajoutent des conditions de température et d'humectation nécessaires à l'infection du feuillage. Ces conditions ont été définies d'abord par les courbes de Mills (1944) puis par celle de McHardy (1989) modifiée par Stensvand (1997).

Le modèle de prévision des risques intégré à RIMpro (Relative Infection Measure) utilise ces paramètres. Développé en 1993 par Marc Trapman de la société hollandaise Bio Fruit Advies, ce modèle est validé et largement utilisé en Europe. Depuis 2003, le logiciel est en cours de validation pour les conditions climatiques du Québec.

Le graphique RIMpro (Figure 4) se divise en trois parties distinctes, du bas vers le haut (Phillion V., 2009) :

- **échelle de temps et pluviométrie** : l'échelle de temps renseigne la date (19/5) accompagnée de l'heure de la simulation, qui est calculée à l'heure normale de l'Est (HNE). Il faut donc ajouter une heure pour obtenir l'heure d'été. Au-dessus de la date, la météo est représentée par une barre **bleu foncé** pour la pluie, et **bleu pâle** lorsque le feuillage est encore mouillé. L'absence de bleu signifie que le feuillage est présumé sec.
- **comptabilité des ascospores** : la comptabilité des ascospores est donnée par un inventaire des spores immatures (**rouge foncé**) et matures (**rouge clair**). Au début de la saison, 100% des ascospores sont immatures. Elles arrivent progressivement à maturité tout au long de la saison. Sur la Figure 4, au 22 mai vers 15h, il reste 30% de spores immatures et 10% sont prêtes à l'éjection avant la pluie.
- **comportement des ascospores** : après une pluie, les spores matures sont éjectées et provoquent un pic d'éjection (**jaune**). L'éjection peut être faible la nuit, malgré un stock de spores matures (MacHardy W. E., 1996). Plus la ligne jaune est élevée, plus le nombre d'ascospores éjectées est important. Selon le modèle, les ascospores éjectées atterrissent directement sur le feuillage sensible et débutent le processus de germination. La quantité de spores vivantes et présentes sur le feuillage est représentée par le **halo blanc**. Le début de l'infection a lieu lors de l'apparition de la **courbe rouge**, qui traduit la sévérité de l'infection en absence de fongicides, en valeur RIM. Le nombre de spores vivantes déposées sur le feuillage (halo blanc) diminue au fur et à mesure de l'infection.

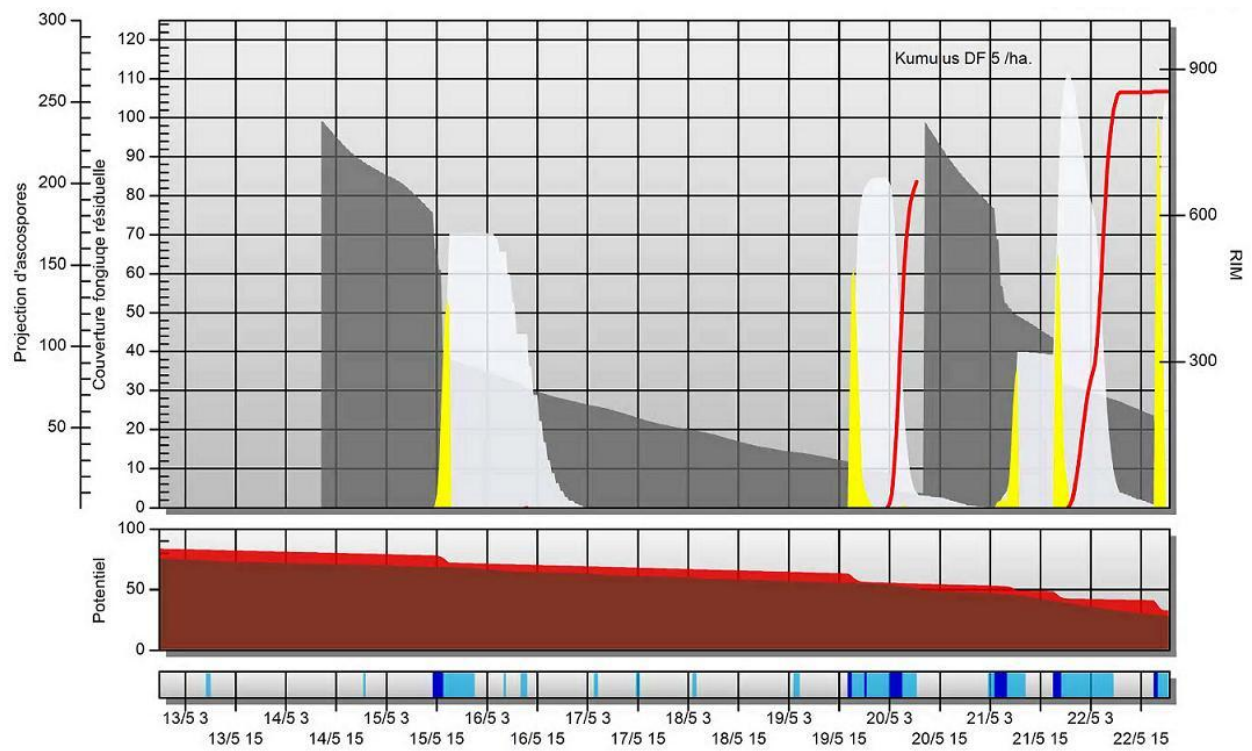


Figure 5 : Graphique RIMpro montrant les résidus de traitements réalisés avec du soufre les 14 et 20 mai 2013 (source IRDA)

Le graphique (Figure 4) montre les simulations réalisées à partir de données climatiques mesurées et donc du passé (à gauche de la **ligne verticale bleu clair**) et prévisionnelles (à droite de la ligne). Cette ligne définit l'heure de calcul des simulations.

RIMpro peut donc représenter simplement une dynamique compliquée et permet de saisir rapidement les étapes critiques pour lutter contre la tavelure. Le graphique RIMpro donne donc un aperçu visuel des paramètres de sortie du modèle. Pour obtenir ces résultats de simulation, un certain nombre de paramètres d'entrée doivent être renseignés ou ajustés selon les conditions locales :

- Données météorologiques mesurées et prévisionnelles
- Biofix de première éjection d'ascospores obtenue en laboratoire
- Biofix de décomposition des feuilles de la litière
- Paramètres d'humectation du feuillage (associés à un seuil d'humidité relative de 85%)

Le logiciel RIMpro est aussi capable de montrer les résidus de pesticides restants sur le feuillage après un traitement (Figure 5), selon les propriétés du produit, la pluviométrie et les températures.

Toutes ces informations font de RIMpro un logiciel facilitant la prise de décision.

La méthodologie employée pour répondre à la problématique posée vise à explorer l'efficacité de différents fongicides appliqués selon plusieurs approches. L'outil prévisionnel RIMpro sera utilisé pour définir différentes stratégies de traitement. Celles-ci seront définies dans une première partie, avec le matériel utilisé et les conditions de l'expérience. Les observations et notations de symptômes seront présentées dans la partie résultats. Enfin une discussion permettra une analyse critique de ces résultats en vue d'apporter des pistes d'évolution du projet.

Tableau II : Stades phénologiques du pommier au verger de Saint-Bruno-de-Montarville en 2013

Stade	Date
débourrement	27 avril 2013
débourrement avancé	30 avril 2013
pré-bouton rose	3 mai 2013
bouton rose	6 mai 2013
bouton rose avancé	8 mai 2013
pleine floraison	10 mai 2013
calice	14 mai 2013
nouaison	18 mai 2013



Figure 6 : Matériel de traitement : cuves, quad et équipements de protection individuels (source IRDA)

I. Matériel et méthodes

Le site d'expérimentation se situe à Saint-Bruno-de-Montarville (QC, Canada) dans le Parc National du Mont Saint-Bruno.

I.1. Matériel végétal

Les pommiers sont des McIntosh sur porte-greffe M9. Cette variété présente différentes sensibilités à la tavelure selon le lieu de production (Biggs A. R. *et al.*, 2010). Dans les conditions environnementales du Québec, cette variété est très sensible à la tavelure. Ils ont été plantés en 2004 selon un espacement interrang de 3,65 m et une espacement entre arbres d'une même rangée de 1,65 m. Une rangée est formée de 30 arbres et est orientée Nord-Sud. L'irrigation est réalisée par un système goutte-à-goutte (non utilisé cette année). Dans les conditions environnementales locales et pour la variété McIntosh, les stades phénologiques du pommier (Annexe I) ont été atteints aux dates du Tableau II.

I.2. Matériel de traitement

Les pesticides sont stockés dans le local phytosanitaire. Les bouillies sont préparées sur place, pour un volume total de 10 litres par traitement. Cette valeur a été estimée en prenant en compte le temps d'application par arbre, le débit de la buse (150 PSI), le volume de purgeage du système de pulvérisation, et le nombre de répétitions.

Les bouillies sont transportées jusqu'au verger dans un système de pulvérisation à 9 cuves de 20 litres et 2 cuves de 100 litres, tracté par un quad (Figure 6). Les cuves sont branchées successivement et manuellement à une pompe reliée à un moteur, permettant ainsi de pulvériser les pesticides à une pression constante par un fusil.

Pour avoir une bonne répartition des produits sur le feuillage et ainsi permettre la comparaison des résultats, les bouillies sont appliquées jusqu'au point d'écoulement. Il s'agit donc de conditions expérimentales de traitement avec un taux d'application estimé à environ 1600 litres par hectare.

Un panneau de protection est transporté derrière l'arbre à traiter. Ceci permet d'éviter la dérive des pesticides entre les rangs lorsqu'il y a du vent.

Les applicateurs sont protégés par le port d'équipements de protection individuels (EPI).

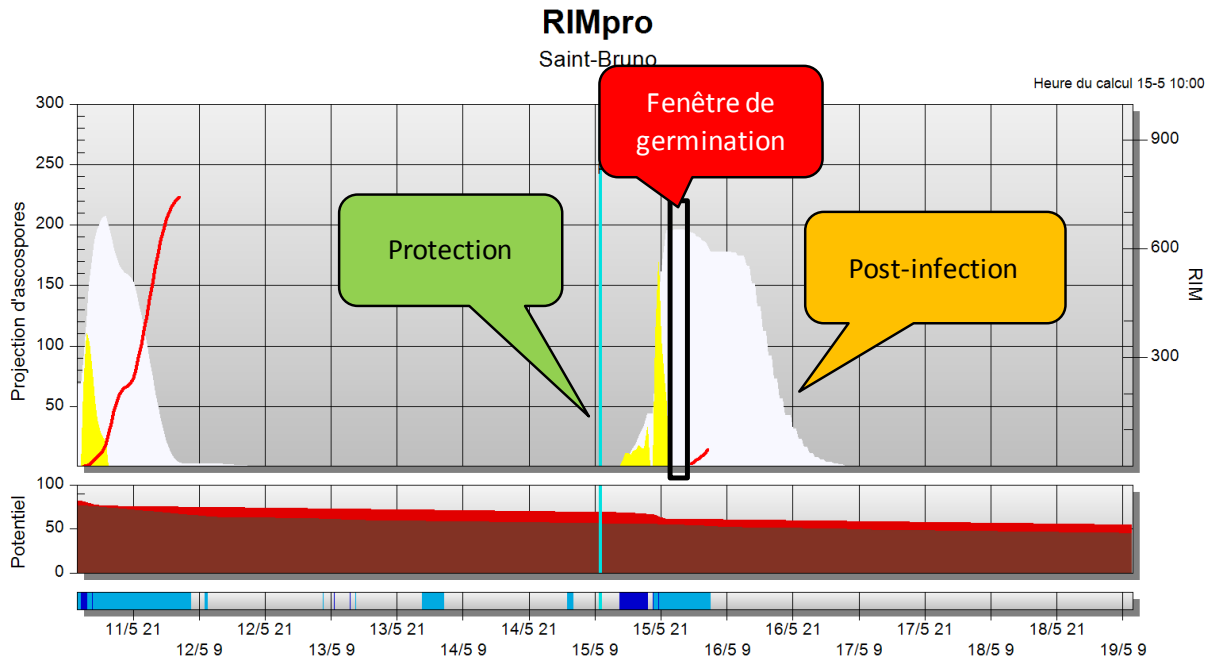


Figure 7 : Positionnement des trois principales stratégies de traitement pour une infection prédite par RIMpro (source IRDA)

Le nettoyage du matériel de traitement est réalisé sur une plate-forme bétonnée. Les eaux de lavage sont transférées sur un Phytobac®, dispositif permettant la dégradation microbiologique des effluents phytosanitaires.

1.3. Traitements

Stratégies étudiées

Les stratégies de traitements ont été définies selon les stades critiques du développement du champignon, en tenant compte des modes d'action des fongicides disponibles sur le marché, et en intégrant les pratiques courantes réalisées par les producteurs. Trois stratégies ont ainsi été proposées (Figure 7) :

➤ **Protection** : la prise de décision se base sur les données météorologiques. RIMpro n'est donc pas utilisé. Les traitements sont répétés au minimum tous les 9 jours / 60 mm de pluie, et au maximum tous les 5 jours / 30 mm de pluie. Les applications sont réalisées sur feuillage sec.

Une stratégie particulière concerne un des traitements, le **Protection bio**. Dans ce cas, des applications supplémentaires au Protection classique sont prévues lorsque le résidu de pesticide prédit par RIMpro est inférieur à 25%. Les traitements supplémentaires sont réalisés en même temps que la stratégie **Germination** avec le même produit.

➤ **Germination** : cette stratégie cible les ascospores vivantes déposées sur le feuillage. Pour assurer une efficacité optimale, ces traitements sont réalisés avant le début de l'infection, lorsque le nombre d'ascospores vivantes sur le feuillage est maximum. L'intervalle qui sépare ces deux conditions est appelé « fenêtre de germination ». Les applications sont faites sur feuillage humide, lorsqu'il pleut.

Il se peut que l'infection débute lorsque les spores ne sont pas toutes déposées sur le feuillage. Cette fenêtre de germination peut aussi être prévue pendant la nuit. Dans ces deux cas, les traitements sont réalisés en **Post-infection 200-400 DH** avec du bicarbonate de potassium associé à du soufre.

Tableau III : Stratégies et traitements étudiés dans le cadre du projet d'efficacité des produits fongicides en 2013 à l'IRDA

Stratégie	Lettre	Produit	Substance active
Témoin non traité	A	Eau	
Protection	B	Captan half	captane
	C	Allegro	fluaziname
		Inspire Super	cyprodinil
			difenoconazole
		A15457B	
	D	Polyram	métirame
	E	Moisturin	
	F	Moisturin	
NCC			
N	Phosphite	phosphite	
Protection bio	O	Kumulus	soufre
Germination	P	Captan half	captane
	Q	Kumulus	soufre
	R	LLS low	polysulfide de calcium
Post-infection 0-200 DH	S	Captan half	captane
	T	Bicarbonate	bicarbonate
		Kumulus	soufre
Post-infection 200-400 DH	N	Bicarbonate	bicarbonate
		Kumulus	soufre
	U	Bicarbonate high	bicarbonate
	V	Bicarbonate	bicarbonate
	W	Bicarbonate	bicarbonate
		Adhere (Pinolène)	
	X	Bicarbonate	bicarbonate
		Huile	
	Y	Bicarbonate	bicarbonate
		Kaolin	
		Kumulus	soufre
	Z	Bicarbonate	bicarbonate
		Kumulus	soufre
	AA	Inspire Super	cyprodinil
difenoconazole			
AB	LLS high	polysulfide de calcium	
AC	Fontelis	penthiopyrade	
Post-infection 400-600 DH	AD	Bicarbonate	bicarbonate
		Kumulus	soufre

- **Post-infection** : les traitements ont lieu entre 0 et 600 Degrés-Heure (DH) en base 0°C après le début de l'infection. L'accumulation de DH est donnée par la somme des moyennes horaires des températures retranchée à la température de base (qui correspond au minimum nécessaire pour que le champignon soit actif). Trois classes ont été définies : **Post-infection 0-200 DH**, **Post-infection 200-400 DH** et **Post-infection 400-600 DH**.

Dans la mesure du possible, le traitement devrait être appliqué en s'approchant au mieux du maximum de DH de chaque classe, pour avoir suffisamment de différences de DH accumulés entre les classes.

Le traitement S (Captan en Post-infection 0-200 DH) est un cas particulier car il est à comparer au traitement P (Captan en Germination). Si les traitements Germination sont réalisés en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre, alors le traitement S sera lui aussi réalisé en Post-infection 200-400 DH pour que la comparaison soit possible.

Lorsque des infections prédites par RIMpro sont rapprochées sur quelques jours, il se peut que le premier traitement réalisé couvre aussi la seconde infection. Dans ce cas, le traitement concerné ne sera réalisé qu'une fois.

Fongicides étudiés

La liste des fongicides appliqués lors de l'expérimentation est donnée au Tableau III. Les produits ont été classés par stratégie de traitement.

Le **Captan** est un produit multi-site de contact couramment utilisé par les producteurs. Le traitement B est considéré comme étant un standard de comparaison.

Le **traitement C** est un programme de traitement étudié par une firme phytosanitaire. Les trois fongicides sont appliqués successivement selon le stade phénologique du pommier (Annexe I). Ce programme combine des produits uni-sites ayant une action biochimique au niveau de la respiration, de la synthèse d'acides aminés et de la synthèse des stérols de la membrane cellulaire.

Le **Moisturin** est un anti-transpirant. Le **NCC** est un polymère qui peut potentiellement renforcer l'efficacité du Moisturin.

Le **phosphite** semble avoir une action d'éliciteur des défenses naturelles des plantes. Seul, son action peut être limitée. Il est donc associé à un traitement Post-infection 200-400 DH.

Le **LLS** (ou Lime Sulphur ou bouillie suflo-calcique) est à base de polysulfide de calcium. Il s'agit d'une formulation particulière de soufre, et semble avoir une certaine efficacité lorsqu'il est appliqué selon la stratégie Germination.

Polyram, **Inspire Super** et **Fontelis** sont des fongicides à base de molécules chimiques particulières et les deux derniers ont la réputation d'être très efficaces. Le Polyram est un multi-site de contact à base de métirame. Inspire Super n'est pas encore homologué au Canada et combine deux substances actives : le difénoconazole de la famille des DMI (DeMethylation Inhibitors), et le cyprodinil de la famille des AP (Anilino-Pyrimidines). La première substance agit au niveau de la synthèse des stérols de la membrane, et la seconde cible la synthèse d'acides aminés. Quant au Fontelis, il est homologué depuis 2012 et cible la respiration. Sa substance active est le penthiopyrade de la famille des SDHI (Succinate dehydrogenase Inibitors) et cible le complexe II de la chaîne respiratoire.

Le **bicarbonate de potassium** est un sel qui donne des résultats intéressants pour lutter contre la tavelure. De plus, cette molécule est plus avantageuse au niveau du coût et de sa toxicité. Il est souvent associé à du **Soufre** (Kumulus) pour renforcer son efficacité. D'autres adjuvants sont testés car ils peuvent renforcer l'efficacité du bicarbonate : **pinolène** (améliore le dépôt des produits), **huile** (améliore l'adhésion des produits), **kaolin** (barrière physique).

1.4. Dispositif expérimental

L'expérience est réalisée en **4 blocs aléatoires incomplets**, avec un cinquième bloc pour les traitements absents des 4 blocs principaux. Ainsi, chaque modalité de traitement est répétée 4 fois. Le témoin non traité est répété 5 fois. L'unité expérimentale correspond à **un arbre**, séparé des autres par un arbre tampon sur une même rangée.

Le nombre de modalités de traitements étant de 30, et le nombre d'arbres par rang étant aussi de 30, un bloc est formé de deux rangs juxtaposés. Les blocs sont séparés entre eux par une rangée d'arbres tampons.

Les blocs ne sont pas positionnés en bordure de parcelle des côtés Est et Ouest de la parcelle. Aux extrémités Nord et Sud des blocs, les parcelles sont entourées d'autres parcelles de pommiers McIntosh cultivés dans les mêmes conditions.

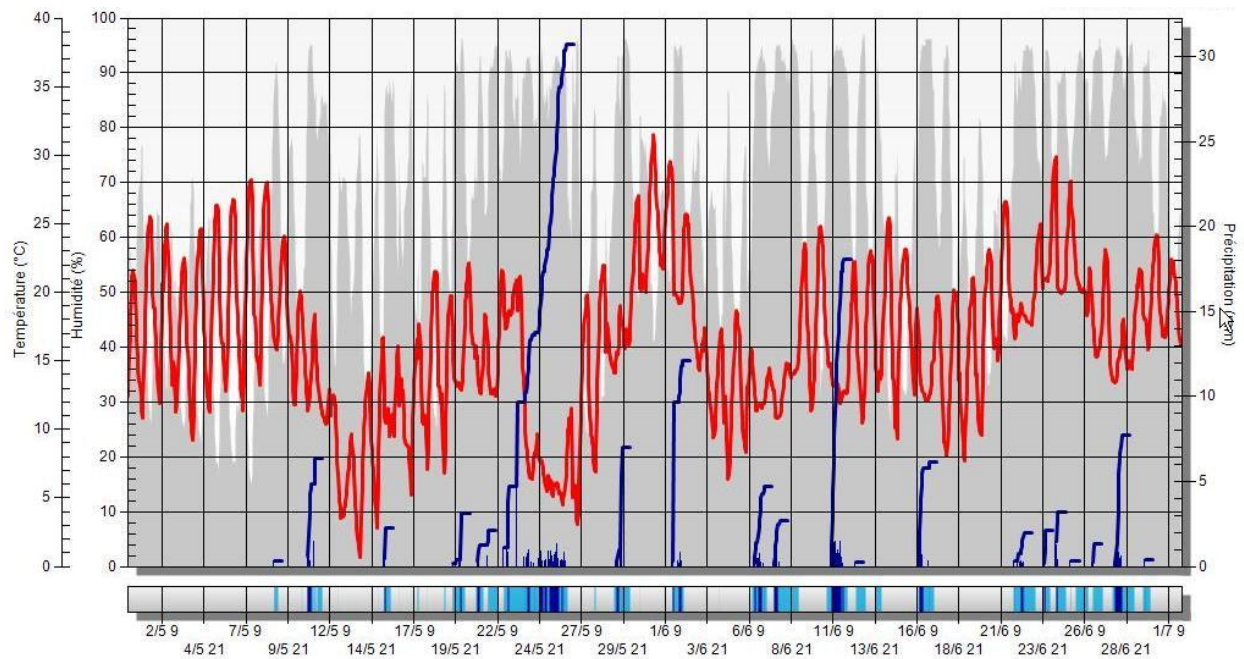


Figure 8 : Données météorologiques mesurées au verger de Saint-Bruno-de-Montarville entre le 1er mai et le 1er juillet 2013 (source IRDA)

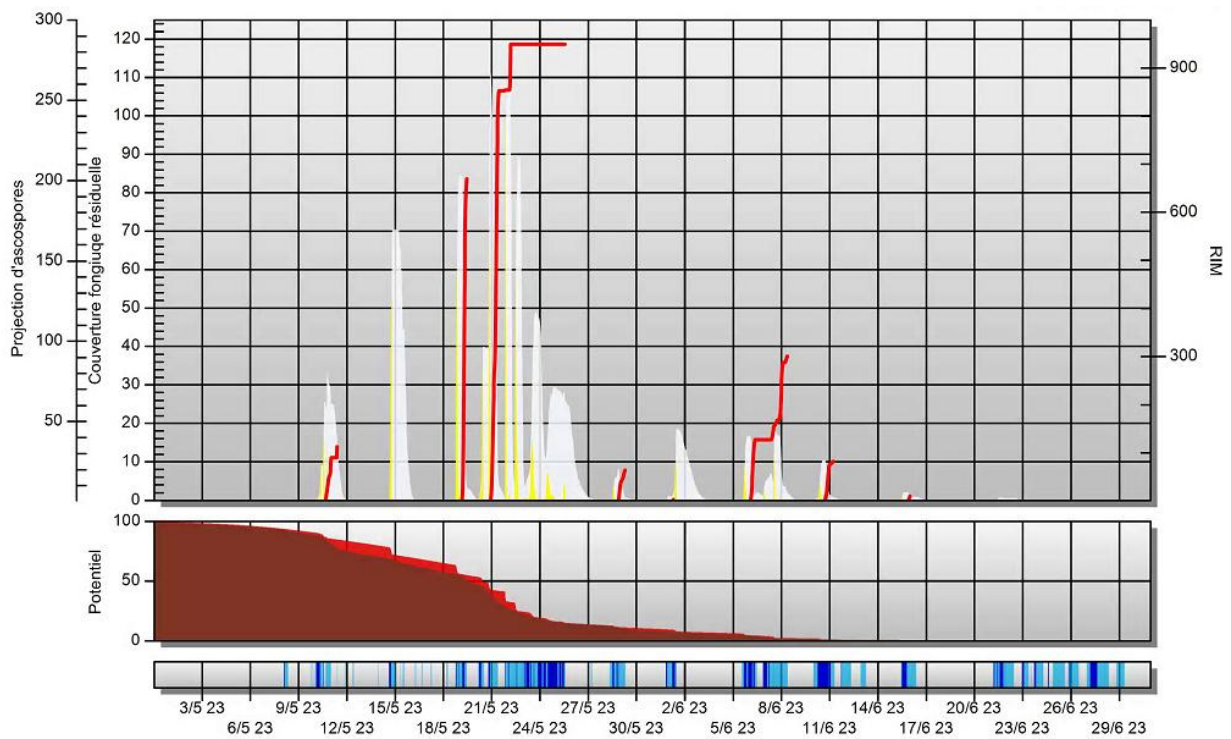


Figure 9 : Simulations RIMpro réalisées pour la saison des éjections primaires de 2013 au verger de Saint-Bruno-De-Montarville (source IRDA)

1.5. Observations

Le développement des symptômes de tavelure est noté lorsque la période des infections primaires est terminée (mi-juin), en tenant compte de la durée d'incubation du champignon, qui est de 14 à 21 jours après infection (MacHardy W. E., 1996). Les notations ont donc été réalisées le 04 juillet 2013.

Sur feuilles

Pour chaque arbre, 15 prolongations de pousses végétatives sont sélectionnées au hasard. Les réitérations (reprise de pousse sur bouquet) et les gourmands ne sont pas comptabilisés. Sur chacune de ces pousses est noté le nombre de feuilles présentant des symptômes de tavelure, sans prendre en considération la proportion du limbe infectée par le champignon.

A l'origine, le nombre de feuilles tavelées sur les bouquets aurait du être comptabilisé selon le même protocole de notation. Mais le débourrement ayant été observé le 27 avril (Tableau II), et les premières éjections d'ascospores ayant eu lieu le 11 mai (juste après la floraison), les feuilles du bouquet ont été considérées comme étant peu sensibles à la tavelure. En effet, le champignon se développe sur les jeunes feuilles du pommier (MacHardy W. E., 1996).

De plus, le nombre moyen de feuilles totales par pousse est noté chaque semaine depuis les premières éjections d'ascospores, et au moment des observations de symptômes sur feuilles.

Sur fruits

Les symptômes de tavelure sont notés aussi sur fruits, à la récolte. Ces observations permettent de confirmer les notations réalisées sur feuilles. La récolte débute fin août, ces observations n'ont donc pas encore été faites.

1.6. Analyse des données

Les analyses seront réalisées pour comparer la moyenne du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les 4 répétitions de chaque traitement. La distribution des notations ne suit pas une loi normale. En effet, les observations sont des données qualitatives à deux possibilités : soit il y a développement de symptômes, soit il n'y en a pas. L'analyse statistique à réaliser est une régression (de type modèle linéaire généralisé ou GML) selon une loi binomiale négative.

Tableau IV : Liste des infections prédites par RIMpro pour le verger de Saint-Bruno-de-Montarville, et valeurs RIM associées (source IRDA)

Date et heure d'infection	Valeur RIM	Risque
11/05/2013 13:00	120	moyen
16/05/2013 03:00	40	faible
20/05/2013 02:00	700	fort
21/05/2013 21:00	850	fort
23/05/2013 01:00	830	fort
23/05/2013 17:00	690	fort
24/05/2013 22:00	300	fort
26/05/2013 07:00	80	faible
29/05/2013 20:00	70	faible
07/06/2013 03:00	120	moyen
08/06/2013 19:00	170	moyen

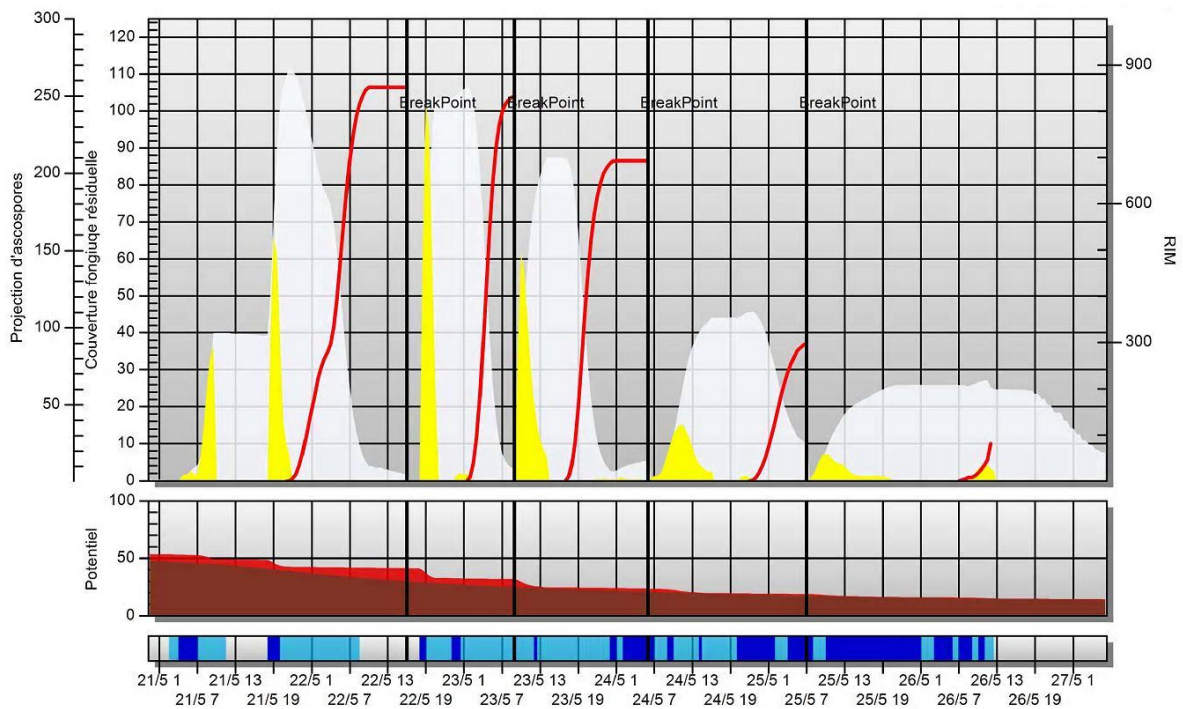


Figure 10 : Simulations RIMpro entre le 21 et le 27 mai 2013, avec placement de Breakpoints pour faciliter la lecture des valeurs RIM (source IRDA)

En toute rigueur, les tests de comparaisons multiples de moyennes devraient être réalisés sur l'ensemble des traitements effectués. Le test de Tukey est utilisé. Mais lorsque le nombre de traitements est élevé, ce test met en évidence très peu de différences significatives. Par conséquent, plusieurs comparaisons sont effectuées, en sélectionnant certains traitements pour une comparaison homogène d'un point de vue chimique ou pour un même nombre de traitements réalisés sur la saison.

II. Résultats

L'expérience a été réalisée entre le 8 mai 2013 et le 9 juin 2013. La fin des éjections d'ascospores causant les infections primaires se situe généralement à la mi-juin (MacHardy W. E., 1996). Les éjections postérieures au 9 juin 2013 sont considérées comme mineures.

II.1. Données climatiques mesurées

Le verger est situé dans une zone climatique de type continental humide. Ce type de climat est marqué par de gros écarts saisonniers de température, et des précipitations qui ont lieu tout au long de l'année. Entre le 1^{er} mai et le 1^{er} juillet 2013, période des éjections d'ascospores, les températures ont été au-dessus des normales saisonnières et atteignent 30°C le 31 mai (Figure 8 page précédente). Des chutes de températures ont été observées vers les 13 et 26 mai, et vers le 5 juin. Le pourcentage d'humidité relative dépasse régulièrement le seuil de 85%, seuil minimal d'hygrométrie retenu pour l'humectation du feuillage dans RIMpro. Généralement, ce dépassement a lieu lors de pluies.

II.2. Simulations RIMpro pour les infections primaires

La date de première éjection des ascospores a été fixée au 11 mai 2013. La Figure 9 (page précédente) montre les éjections et infections primaires de tavelure qui ont eu lieu entre le 1^{er} mai et le 1^{er} juillet 2013. Les infections sont bien distinctes les unes des autres, sauf entre le 21 et le 27 mai. Durant cette période, une pluviométrie intense et régulière associée à des températures optimales (Figure 8) au moins jusqu'au 23 mai ont provoqué des pics successifs d'éjections d'ascospores. Cela se traduit par un dépassement de la valeur RIM 2000, en cas d'absence de traitement fongicide, et une chute brutale du stock d'ascospores présentes dans la litière.

Selon Phillion V. (2009), des travaux de validation ont permis de déterminer que les infections de moins de 100 sur l'échelle RIM sont de risques faibles. Les infections dont l'indice dépasse 300 sont de risques très élevés. Le Tableau IV (page précédente) donne la liste des infections qui ont eu lieu pendant la période des infections primaires, et associe la valeur RIM à la sévérité de l'infection. Pour identifier la valeur RIM d'une infection lorsque les infections sont rapprochées, des « Breakpoints » sont positionnés après chaque pic d'éjections d'ascospores. La Figure 10 (page précédente) illustre les Breakpoints positionnés pour la période du 21 au 27 mai 2013.

La valeur RIM est bien au-dessus de 300 pour les infections des 20, 21, 23 (2 infections le même jour) et 24 mai. Sur cette période courte, il y aura eu 5 infections de risque très élevé sur un nombre total de 11 infections.

II.3. Dates de traitements

Les traitements ont été effectués aux dates données dans le Tableau V. Par soucis de simplification, ce tableau ne montre pas les heures de traitements. Il permet de visualiser un enchaînement classique des stratégies, entre le 14 et le 17 mai. Les autres traitements ont été effectués selon les cas particuliers définis dans le protocole.

Quelques exemples de prises de décision :

- Le **traitement N** combine une application en Protection et une application en Post-infection 200-400 DH. La prise de décision se base sur les critères définis pour chaque stratégie dans le protocole.
 - Pour les traitements **Germination** (P à R), 5 applications ont été réalisées en Germination, et 4 applications ont été faites en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate+Soufre car l'heure de traitement optimale se situait entre 22h et 4h.
 - Comme cela a été mentionné plus haut (page 7), le **traitement S** (Captan Post-infection 0-200 DH) suit le **traitement P** (Captan Germination) : il est traité en Post-infection 0-200 DH lorsque les Germinations ont bien été appliquées en Germination; il est traité en Post-infection 200-400 DH lorsque les Germinations n'ont pas pu être traitées en Germination.
-

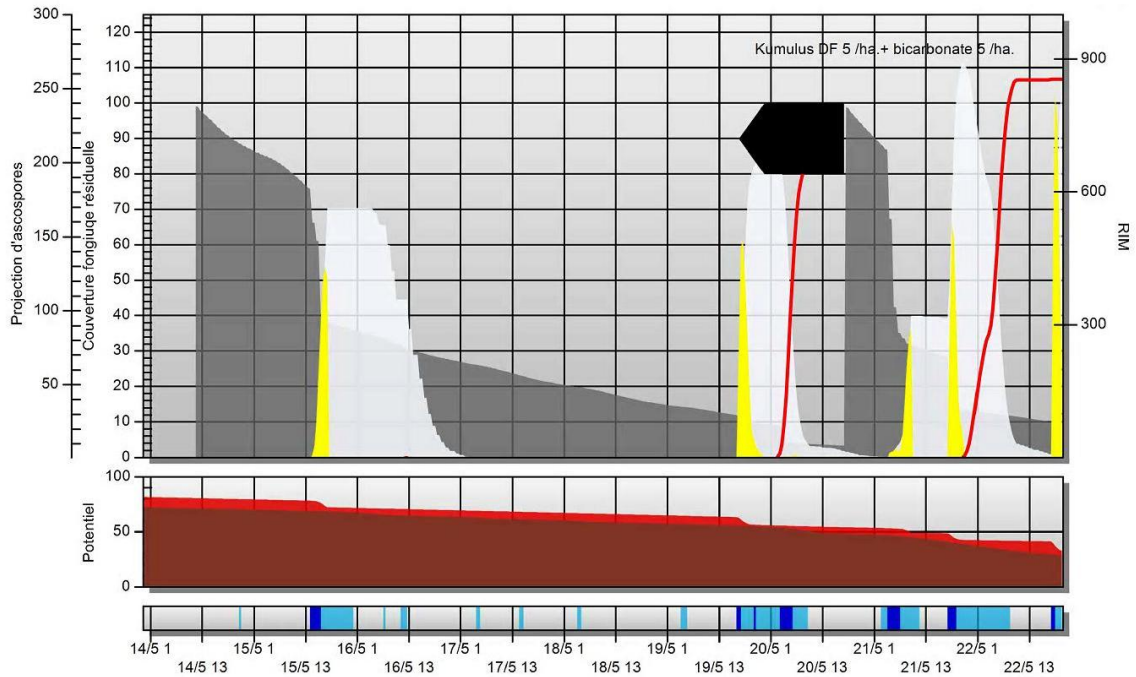


Figure 11 : Simulations RIMpro réalisées entre le 14 et le 22 mai, avec la couverture fongique résiduelle (halo gris) et la période d'effet curatif (flèche noire) pour les traitements réalisés en Protection bio (source IRDA)

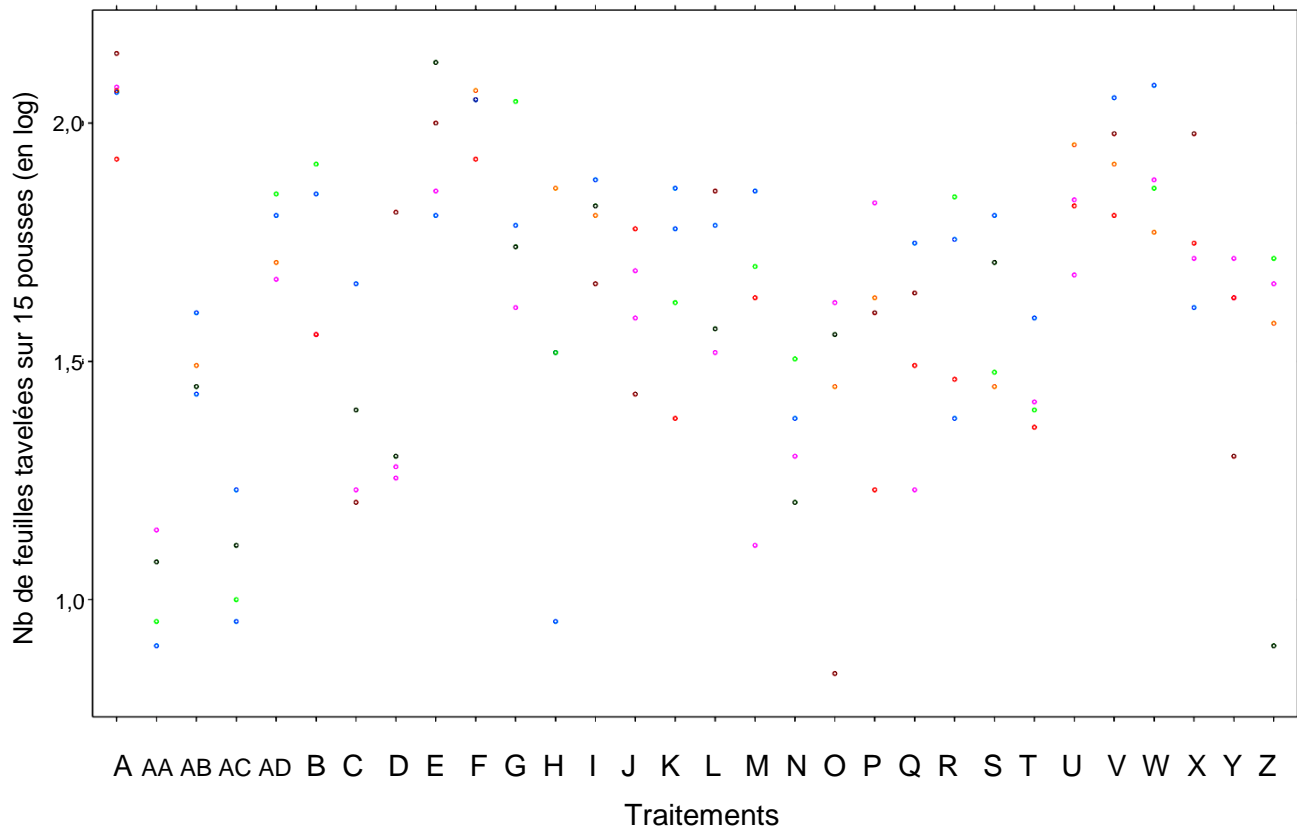


Figure 12 : Nuage de points représentant les observations réalisées pour chaque traitement. Chaque point représente la moyenne du nombre de feuilles tavelées observées sur 15 pousses par répétition.

- Pour le **Protection bio** (traitement O), les résidus de pesticides sont inférieurs à 25% au moment de l'infection du 20 mai (halo gris sur la Figure 11). Le prochain traitement Protection sera appliqué après le début de l'infection. Selon le protocole, le traitement O est à réaliser en Germination avec la même bouillie. Or, le début de l'infection est prévu à 2h du matin. Par conséquent, ce traitement a été fait en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre. La période d'effet curatif du traitement est indiquée par la flèche noire. L'infection a dans ce cas bien été couverte.
- Le **traitement T** est exclusivement appliqué en Post-infection 0-200 DH. Chaque infection mène à un traitement T, sauf pour les deux infections du 23 mai, la deuxième étant couverte par le traitement effectué pour la première infection de cette journée.

II.4. Observations des symptômes de tavelure sur feuilles

Le témoin non traité (A) est la modalité qui montre le plus de symptômes de tavelure (Figure 12), avec un total de 115 feuilles tavelées sur 15 pousses. Le standard de comparaison (traitement B) a permis de diminuer de moitié ces symptômes (56 feuilles sur 15 pousses).

Certaines modalités sont proches du témoin non traité, comme les traitements E et F, tous deux à base de Moisturin.

D'autres modalités ont une certaine efficacité, mais qui reste inférieure au standard de comparaison. C'est le cas des traitements U, V et W réalisés en Post-infection 200-400 DH.

Deux traitements se démarquent des autres par leur efficacité : les modalités AA (Inspire Super) et AC (Fontelis).

Sans tenir compte des différences entre modalités (d'un point de vue chimique ou du nombre de traitements réalisés), la stratégie Post-infection 0-200 DH semble être la plus efficace, suivie par le Protection, puis le Germination, le Post-infection 400-600 et le Post-infection 200-400 DH. Cette remarque est fondée sur l'observation générale des symptômes et ne fait pas appel à des analyses statistiques. Il s'agit d'une tendance.

Il est à noter aussi que certaines observations semblent aberrantes. Une des répétitions montre peu de symptômes par rapport aux trois autres pour les modalités H (non étudié dans ce rapport), M, O et Z. Pour la modalité D, une répétition semble montrer plus de symptômes que les trois autres répétitions.

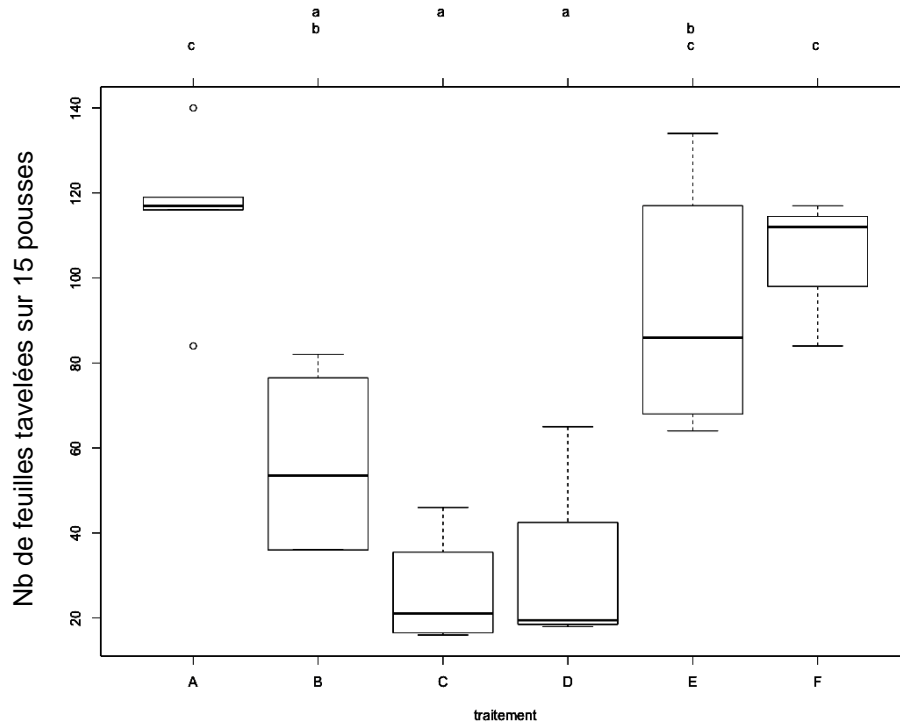


Figure 13 : Comparaison des moyennes (test Tukey, groupes en haut du graphique) du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les traitements A (témoin non traité), B (Captan half, Protection), C (programme de traitement avec 3 fongicides, Protection), D (Polyram, Protection), E (Moisturin, Protection), et F (Moisturin + NCC, Protection).

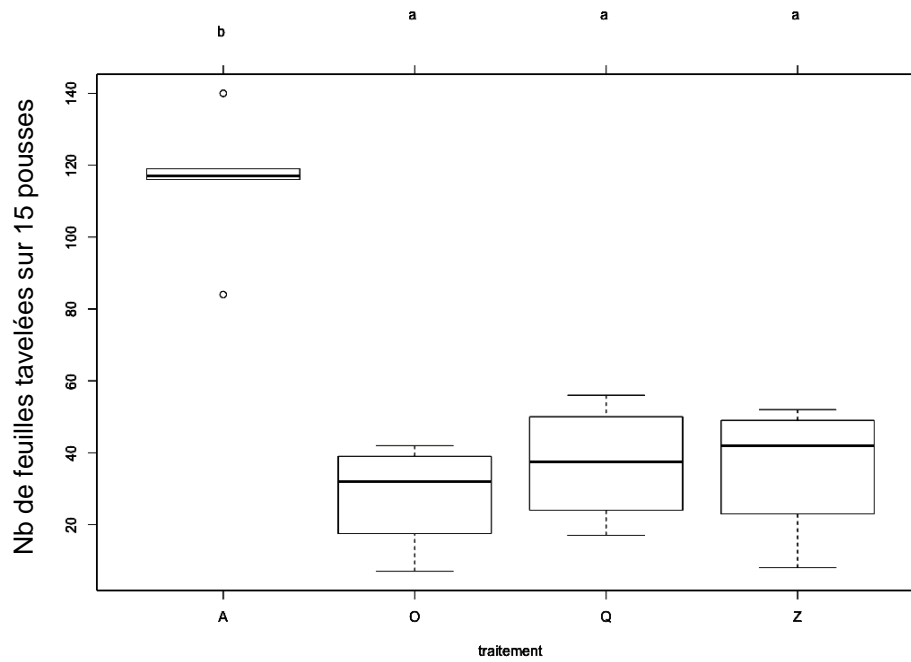


Figure 14 : Comparaison des moyennes (test Tukey, groupes en haut du graphique) du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les traitements A (témoin non traité), O (Kumulus, Protection bio), Q (Kumulus, Germination), et Z (Bicarbonate+soufre, Post-infection 200-400 DH)

II.5. Comparaisons des traitements par stratégie

Stratégie Protection

Les traitements B à F ont été effectués 5 fois pendant la période des infections primaires, selon la stratégie Protection. Le nombre de feuilles tavelées pour 15 pousses ont été comparées avec le témoin non traité (traitement A) selon un test Tukey (Figure 13).

Seuls le Captan (B), le programme utilisant 3 fongicides (C) et le Polyram (D) ont une efficacité significative par rapport au témoin non traité. Les deux traitements à base de Moisturin (un anti-transpirant) ne montrent pas d'efficacité significatives. L'ajout de NCC supposé améliorer l'efficacité du Moisturin semble au contraire diminuer son efficacité. En effet, le Moisturin appliqué seul et le Captan sont aussi efficaces selon le test Tukey.

Stratégie Protection bio

Le traitement Protection bio (O) est le seul qui combine des applications effectuées en Protection, en Germination et en Post-infection 200-400 DH. Par conséquent, il ne devrait être comparé qu'au témoin non traité.

Néanmoins, les traitements faits en Germination et en Post-infection 200-400 DH ont été fait en même temps et avec les mêmes produits que certaines applications des traitements Q (Kumulus en Germination, et Bicarbonate + Soufre en Post-infection 200-400 DH) et Z (Bicarbonate + Soufre en Post-infection 200-400 DH). Pour ces trois traitements, 9 applications ont été réalisées pendant la période des infections primaires.

Il y a donc une certaine comparaison possible entre ces modalités qui sont aussi efficaces les unes que les autres (Figure 14). Ces trois modalités ont été traitées 4 fois en même temps avec du Bicarbonate + Soufre en Post-infection 200-400 DH. L'absence de différences significatives d'efficacité reflète donc une efficacité similaire des 5 applications restantes, soit :

- Pour le O : 3 applications Kumulus (Protection) et 2 applications Kumulus (Germination)
- Pour le Q : 5 applications Kumulus (Germination)
- Pour le Z : 5 applications Bicarbonate + Kumulus (Post-infection 200-400 DH)

Et pour le Q, seules 3 applications diffèrent du traitement O. Cela signifie que le Kumulus est aussi efficace quand il est appliqué en Protection ou en Germination, dans les conditions de l'expérience.

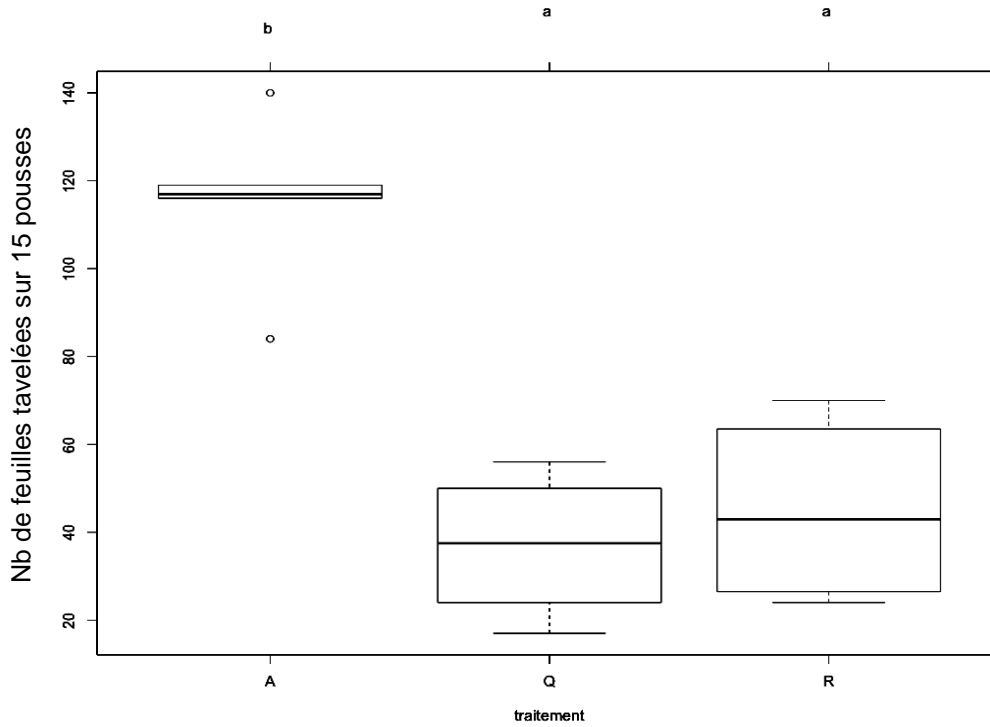


Figure 15 : Comparaison des moyennes (test Tukey, groupes en haut du graphique) du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les traitements A (témoin non traité), Q (Kumulus, Germination) et R (LLS low, Germination)

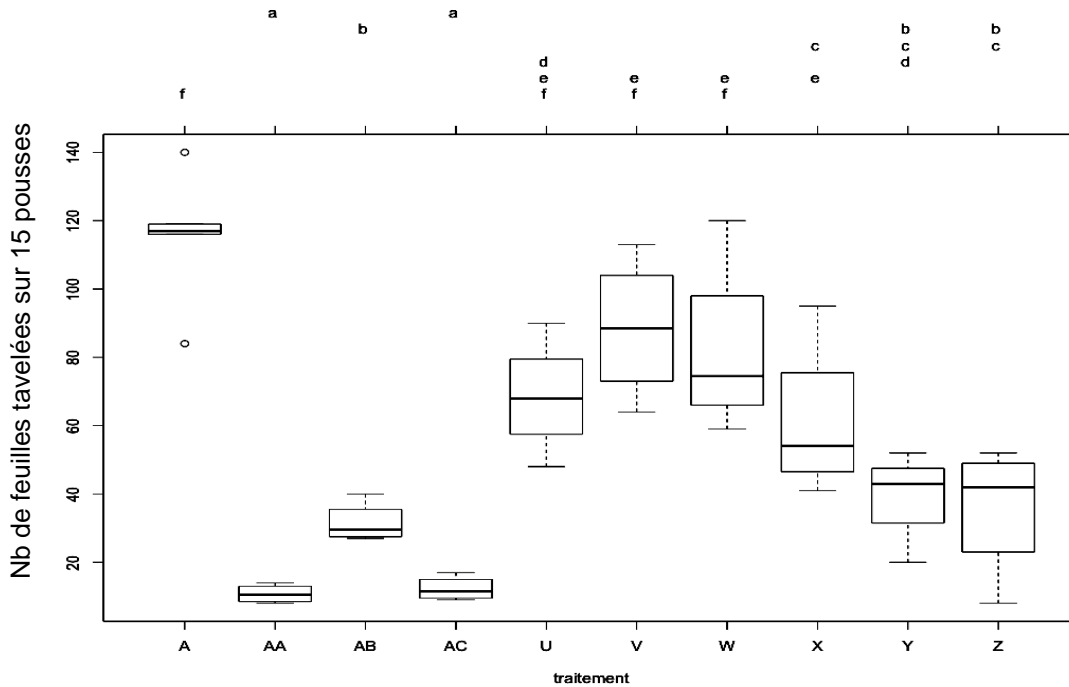


Figure 16 : Comparaison des moyennes (test Tukey, groupes en haut du graphique) du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les traitements A (témoin non traité), et les traitements effectués en Post-infection 200-400 DH : AA (Inspire super), AB (LLS high), AC (Fontelis), U (Bicarbonate high), V (Bicarbonate), W (Bicarbonate+Adhere), X (Bicarbonate+huile), Y (Bicarbonate+soufre+kaolin) et Z (Bicarbonate+soufre)

Stratégie Germination

Les traitements Q (Kumulus) et R (Lime Sulphur) ont été appliqués 5 fois en Germination et en même temps pendant la période des infections primaires. Le passage en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre a été réalisé 4 fois pour les deux modalités et en même temps.

L'absence de différences significatives entre les deux traitements (Figure 15) montre une efficacité similaire des deux formulations à base de soufre, lorsqu'elles sont appliquées en Germination.

Stratégie Post-infection 200-400 DH

La stratégie Post-infection 200-400 DH concerne 9 modalités de traitements qui ont été appliqués en même temps et 9 fois au cours des infections primaires. Ils sont donc tous comparables (Figure 16).

Les traitements U et V sont deux doses de Bicarbonate seul. Deux adjuvants différents ont été ajoutés aux traitements W (pinolène) et X (huile). Aucun de ces quatre traitements ne diffère significativement les uns des autres au niveau des efficacités. Les deux adjuvants n'améliorent pas l'efficacité du bicarbonate. Néanmoins, on peut noter que l'huile est le moins mauvais des deux adjuvants, car les trois autres modalités ne diffèrent pas significativement du témoin non traité. L'huile ne diffère pas significativement des traitements à base de Bicarbonate + Soufre.

A noter aussi que le Bicarbonate haute dose (U) semble être aussi efficace que le traitement Y (Bicarbonate + Soufre + Kaolin). Mais cette remarque doit être nuancée car le test Tukey a tendance à montrer moins de différences significatives lorsque le nombre de traitements comparés augmente.

Le Bicarbonate est associé à du soufre seul pour le traitement Z, et à du soufre et du kaolin pour le traitement Y. Ces deux bouillies ont une efficacité similaire. Le kaolin n'améliore donc pas l'efficacité du mélange Bicarbonate + Soufre, mais ne la diminue pas non plus.

Le traitement AB à base de Lime Sulphur est aussi efficace que les deux bouillies à base de Bicarbonate + Soufre, mais est plus efficace que l'association Bicarbonate + huile.

Les traitements AA (Inspire Super) et AC (Fontelis) sont les plus efficaces de la stratégie Post-infection 200-400 DH. Ils montrent un nombre de feuilles tavelées pour 15 pousses de 11 et 12 respectivement.

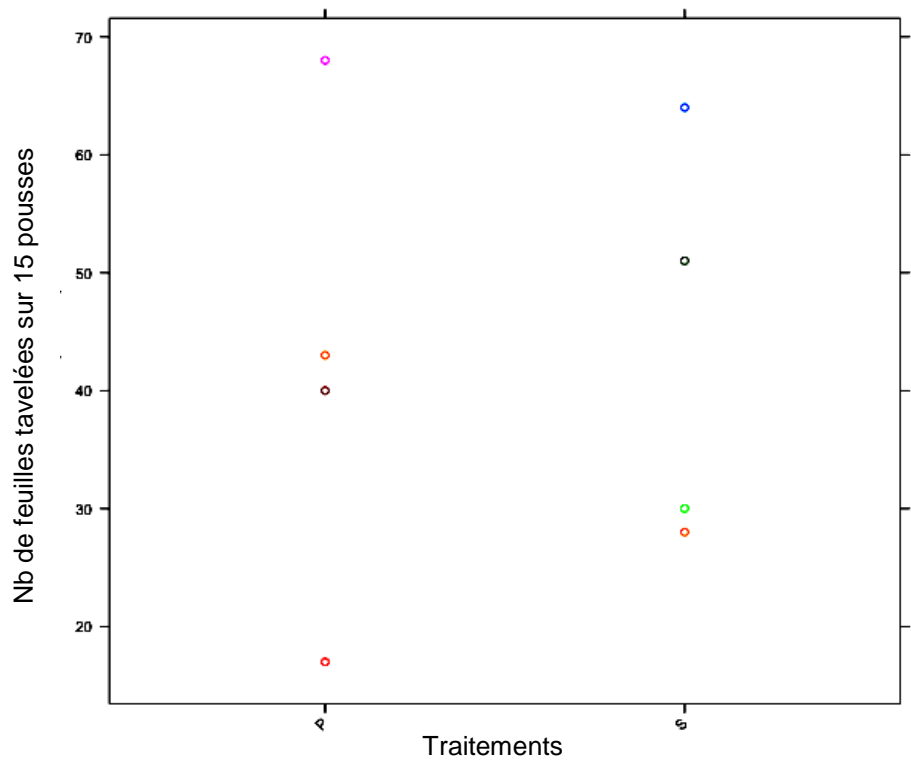


Figure 17 : Moyennes du nombre de feuilles tavelées pour 15 pousses pour les 4 répétitions des traitements Q (Kumulus) et R (LLS low)

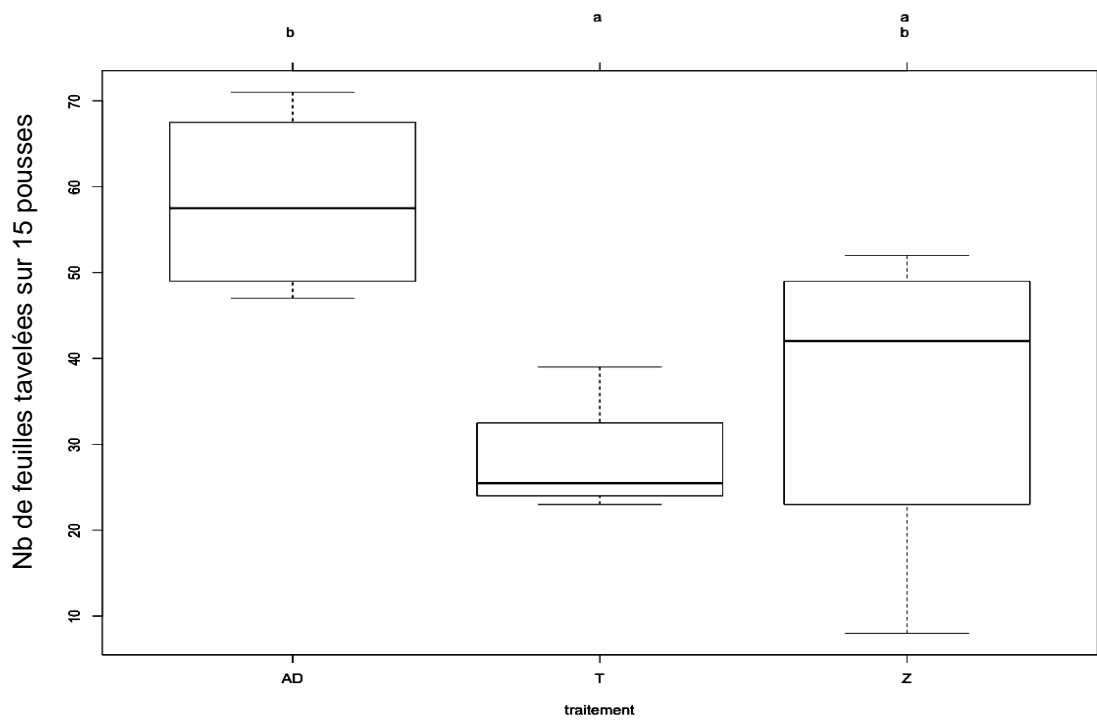


Figure 18 : Comparaison des moyennes (test Tukey, groupes en haut du graphique) du nombre de feuilles tavelées sur 15 pousses pour les traitements Bicarbonate+soufre AD (Post-infection 400-600 DH), T (Post-infection 0-200 DH) et Z (Post-infection 200-400 DH)

II.6. Autres comparaisons de traitements

Efficacité du Captan

Deux modalités de traitements à base de Captan sont comparables : le P réalisé en Germination, et le S de la Post-infection 0-200 DH. Le nombre d'applications est de 9 pour les deux. Cependant, 4 traitements ont été faits en même temps pour les 2 modalités en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre (Tableau V). Par conséquent, seules 5 applications ont été positionnées à des moments différents. Les éventuelles différences d'efficacité observées entre ces deux modalités reflètent donc l'effet de ces 5 applications.

Ces traitements ont des efficacités similaires (Figure 17). L'application de Captan serait donc aussi efficace en Germination qu'en Post-infection 0-200 DH. Cette observation est plutôt surprenante car le Captan est un fongicide de contact. Il n'est pas sensé avoir une efficacité sur le champignon lorsque celui-ci a pénétré la cuticule.

Efficacité du Bicarbonate + Soufre

L'association du Bicarbonate et du Soufre a été testé dans les trois stratégies Post-infection : T pour le 0-200 DH, Z pour le 200-400 DH et AD pour le 400-600 DH. Ces bouillies ont été appliquées respectivement 10, 9 et 7 fois pendant la période d'éjection des ascospores. Mais ces traitements sont réalisés en tant que fongicides curatifs. Selon le protocole expérimental, lorsqu'une infection est couverte par le Post-infection de l'infection précédente, elle ne doit pas être traitée à nouveau. La comparaison reste donc possible entre ces traitements.

Plus on s'éloigne du début de l'infection, moins le traitement est efficace (Figure 18), avec néanmoins une efficacité assez proche pour les Post-infections 0-200 et 200-400 DH. Mais il a été mentionné au II.4. (p. 12) qu'une des répétitions du Z semble anormalement plus faible que les trois autres répétitions, ce qui se traduit par un écart-type plus important pour ce traitement.

Efficacité du Phosphite

Le traitement N associe des applications de Phosphite en Protection avec du Bicarbonate + Soufre en Post-infection 200-400 DH. Il est donc à comparer au traitement Z (Bicarbonate + Soufre en Post-infection 200-400 DH). Les seuls traitements qui diffèrent entre ces deux modalités sont les applications de Phosphite en Protection pour le N.

Les résultats (non présentés ici) ne montrent pas de différences significatives, probablement à cause du fort écart-type pour le traitement Z.

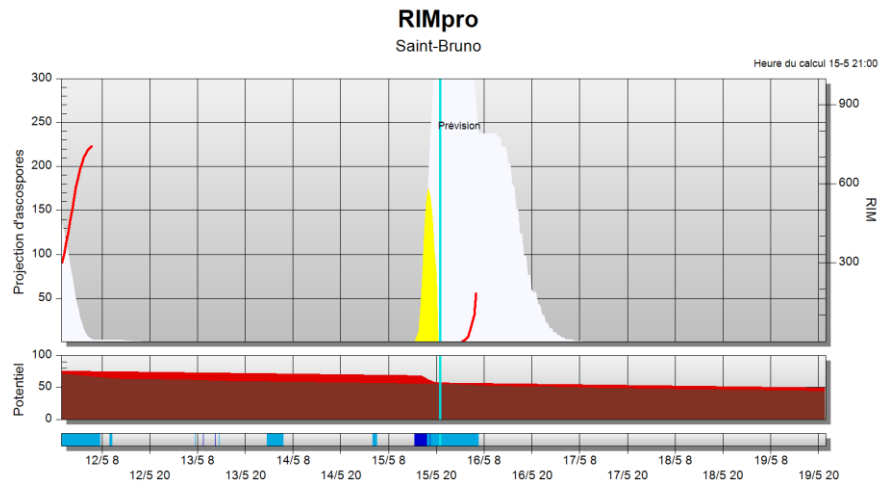
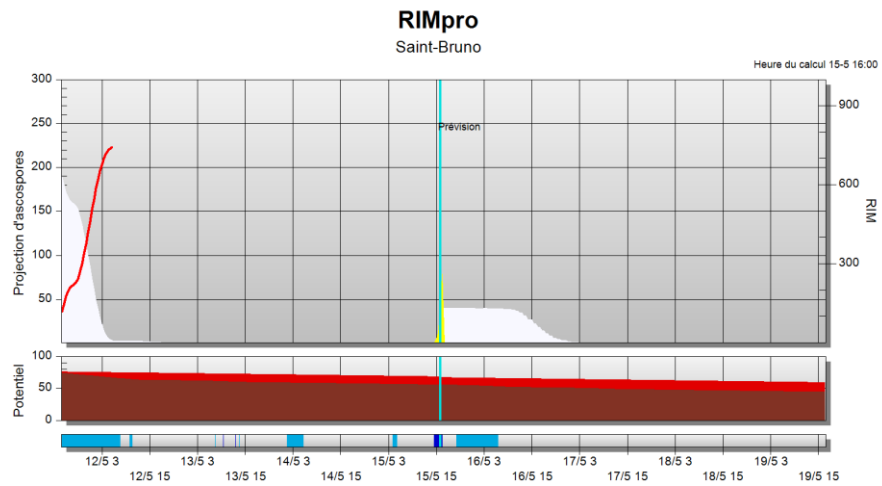
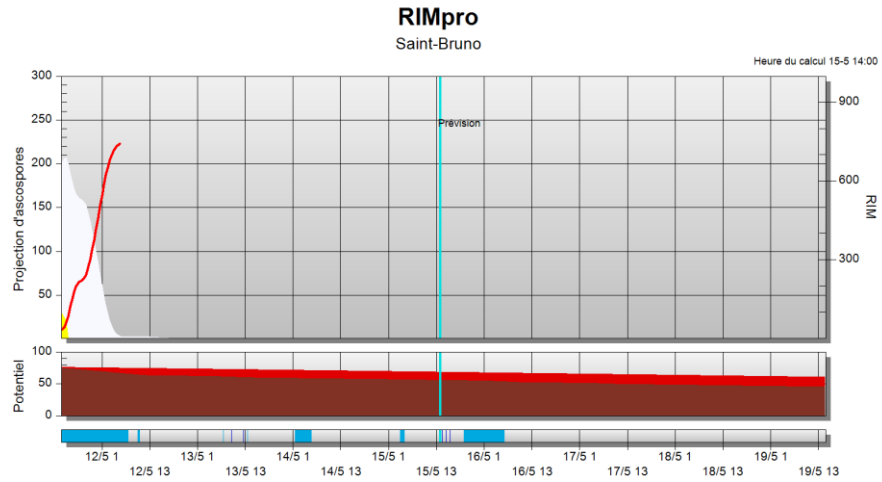


Figure 19 : Succession de 3 simulations RIMpro réalisées (de haut en bas) le 15 mai 2013 à 15h, 17h et 22h (source IRDA)

III. Discussion

III.1. Aspects généraux

L'expérimentation traitée ici vise à explorer l'efficacité de différents fongicides appliqués selon plusieurs approches. Il s'agit d'une expérience exploratoire qui ne peut pas être raisonnée comme une expérience principale ou une expérience de confirmation (Dagnelie P., 2012). Ce type d'expérience sert à dégrossir un problème nouveau. Le matériel expérimental mis à disposition à ce stade de la recherche est souvent peu abondant face à la variabilité de traitements possibles.

De plus, le pommier est une culture pérenne qui ne sera replantée que tous les 20 à 30 ans. Les arbres ont besoin d'espace pour se développer. Avec des écarts de quelques mètres, on arrive rapidement à devoir mettre en place des expériences de très grandes étendues. C'est pourquoi les parcelles ne sont constituées que d'un seul arbre (deux en prenant en compte les arbres tampons) et qu'il n'est pas envisageable d'effectuer une seule expérimentation par dispositif.

Dans cette expérimentation, le nombre de répétitions n'est pas suffisant pour s'assurer d'avoir suffisamment de notations pour obtenir une moyenne représentative. Et toujours pour des raisons d'économies logistiques, les différents traitements testés n'ont pas tous les mêmes objectifs (voir I.3. page 6)

III.2. Prévisions RIMpro

Les simulations RIMpro peuvent fournir des informations et des prévisions erronées si les valeurs données à certains paramètres d'entrée ne sont pas correctes.

Les **prévisions météorologiques**, qui sont actualisées toutes les 6 heures environ, peuvent ne pas être représentatives du microclimat du verger d'étude. La Figure 19 montre l'évolution des conditions mesurées (actualisées toutes les heures) par rapport aux prévisions. Les prévisions d'humectation du feuillage (seuil de 85%) ne se sont pas révélées exactes. Il n'y a donc pas d'interruption de l'humectation après la pluie mesurée, conditions propices à une infection. Les simulations d'éjection d'ascospores et les prévisions d'infections changent en quelques heures seulement.

Lorsque beaucoup d'ascospores sont matures, mais toujours logées dans les pseudothèces des feuilles de la litière, il faut être particulièrement vigilant si les prévisions météorologiques ne semblent pas précises.

Un autre élément de discussion pour les prévisions météorologiques concerne la maturation des ascospores. Gadoury D. M. *et al.* (2004) ont montré qu'un modèle d'accumulation de degrés-jours (en base 0°C) permet une bonne estimation de l'accumulation d'ascospores matures, et serait un bon moyen d'estimer l'inoculum primaire. Les prévisions de températures n'étant pas exactes, le stock prédit d'ascospores matures peut varier, mais ces variations restent négligeables par rapport aux conséquences que peuvent avoir de mauvaises prévisions d'évènements pluvieux.

Un autre paramètre est difficile à fixer : le **biofix de décomposition des feuilles** de la litière. Cette donnée joue un rôle pour définir le stock d'ascospores restant dans la litière, et donc du nombre d'ascospores viables et matures, prêtes à être éjectées. Si ce paramètre est déjà difficile à déterminer à la fin de la période des infections primaires, il est encore plus compliqué de prévoir cette date au début de la saison.

Pour le **biofix de première éjection d'ascospores**, l'éjection forcée en laboratoire est une technique relativement bien maîtrisée. Elle permet de définir l'accumulation de degrés-jours nécessaires pour atteindre la première éjection.

La prise en compte de la **durée d'humectation du feuillage** n'est pas encore optimisée dans la version actuelle de RIMpro. Des sondes d'humectation permettent de savoir si le feuillage est mouillé ou non. D'autres sondes placées en verger permettent de connaître le pourcentage d'humidité relative au niveau des arbres.

La valeur optimale d'humidité relative retenue à partir de laquelle la tavelure est dans des conditions optimales pour infecter le feuillage est 85%. Les données mesurées permettent d'ajuster la durée de la période propice à l'infection, selon les conditions d'humectation et d'humidité relative. Néanmoins, des études ont montré que les sondes d'humectation sèchent plus vite qu'une feuille, à cause notamment des propriétés physiques de surface différentes entre une feuille de pommier et un capteur (Leca A., 2011). Des études de validation sont en cours.

III.3. Efficacité des stratégies de traitement

Protection

En Protection, certains traitements sont particulièrement efficaces : le programme à 3 fongicides (C) et le Polyram (D). Le premier met en jeu au moins 3 substances actives uni-sites appartenant à 3 familles chimiques différentes (fluaziname, cyprodinil, difénoconazole), et le second est à base de métirame, un multi-site.

Le difénoconazole a une action en Protection, mais aussi en curatif (Dahmen H. *et al.*, 1992). Le traitement AA effectué en Post-infection 200-400 DH utilise cette molécule. Même si le nombre de traitement est plus élevé (Tableau V), le traitement AA est le plus efficace des traitements réalisés dans cette étude.

Cela confirme que Inspire Super peut être utilisé en Protection ou en Post-infection, avec une forte efficacité dans les deux cas.

Il reste cependant un élément à confirmer. Le métirame étant une substance active efficace en Protection, il faut qu'il y ait un certain avantage à utiliser une stratégie plus complexe alternant 3 fongicides (et nécessitant l'utilisation de RIMpro pour les traitements en Post-infection). De plus, les uni-sites ont un risque moyen à fort de développer l'apparition de résistances (FRAC, 2013). Le métirame étant un multi-site, le risque est faible, même si certains cas ont montré une baisse de sensibilité de la tavelure face à un autre multi-site, le Captan (Luciana P. *et al.*, 2008), dans des conditions de laboratoire.

Protection bio

Le soufre (Kumulus) peut être utilisé en Protection avec la même efficacité qu'en Germination. Il convient donc de ne retenir que les traitements Protection, car la stratégie Germination est bien plus complexe à gérer : suivi heure par heure des prévisions RIMpro si une infection est prévue, traitements sous la pluie et parfois la nuit, nécessité de traiter rapidement tout le verger.

De plus, le traitement Bicarbonate+soufre en Post-infection 200-400 DH est aussi efficace selon les tests statistiques que le traitement Protection bio utilisant seulement du soufre. Le soufre ayant une action en Protection, on peut se demander si il a une efficacité en curatif. Si c'est le cas, alors le Bicarbonate pourrait avoir une efficacité limitée en curatif. En effet, la Figure 16 suggère que le Bicarbonate seul a une efficacité très faible.

Germination

Les deux formulations de soufre (Kumulus et LLS) ayant des efficacités similaires, le choix du produit à utiliser peut se justifier selon les préférences de l'applicateur.

Une remarque intéressante concerne la complexité logistique pour cette stratégie par rapport à la stratégie Protection. D'après la Figure 12, l'efficacité des traitements Germination (Q et R) est sensiblement proche de celle du standard de comparaison, le traitement Captan (B). Comme il a été dit dans le paragraphe précédent, la stratégie Germination est particulièrement contraignante à mettre en place, et l'efficacité du soufre est similaire en Germination et en Protection. La stratégie Germination semble donc avoir plus d'inconvénients pratiques sans avantages agronomiques. Cette stratégie aura de l'intérêt lorsque des fongicides auront montré une forte efficacité seulement lors de la fenêtre de germination.

Post-infection

En curatif, les molécules chimiques sont plus efficaces que les traitements utilisant une molécule inorganique, le soufre. Cela témoigne d'une efficacité limitée du soufre, mais aussi de l'effet systémique des substances actives des formulations Inspire Super et Fontelis. En effet, ces substances ciblent certaines réactions métaboliques cellulaires du champignon. Mais pour rappel, ces molécules peuvent sélectionner des souches résistantes de tavelure (FRAC, 2013).

III.4. Efficacité des fongicides et autres produits

Il faut distinguer les fongicides, les adjuvants et les autres substances aux propriétés diverses.

Fongicides

Le cas du **Captan** qui est aussi efficace en Germination (P) qu'en Post-infection 0-200 DH (S) est intrigant. Les difficultés rencontrées pour gérer les traitements Germination font qu'il serait bien plus intéressant et plus flexible d'utiliser ce fongicide en Post-infection 0-200 DH.

Mais par rapport au traitement B (Captan standard de comparaison) réalisé en Protection, l'écart d'efficacité n'est pas si important. Et il ne faut pas oublier les 4 applications effectuées en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre pour les traitements P et S. Ces applications pourraient justifier à elles seules cet écart.

Si cela est exact, on peut se poser la question de savoir si le Captan est vraiment efficace en Germination ou en Post-infection 0-200 DH, et si ce n'est pas plutôt l'efficacité des Post-infections 200-400 DH qui est montré.

Autre possibilité, le Captan appliqué en Post-infection 0-200 DH pourrait avoir un effet indirect en préventif, à cause des résidus de pesticides non lessivés. Par exemple, le traitement Post-infection 0-200 DH du 23 mai pourrait avoir une action préventive sur les infections du 24 et du 26 mai.

Ces remarques montrent la difficulté d'analyser des combinaisons de traitements lorsque chaque composante de la combinaison n'est pas testée individuellement.

Le **Bicarbonate** appliqué seul, même en forte dose, est moins efficace que l'association Bicarbonate + Soufre. Un traitement Soufre seul appliqué en Post-infection 200-400 DH permettrait de juger l'efficacité du Bicarbonate. Soit le Bicarbonate est finalement peu efficace et dans ce cas, c'est le Soufre seul qui permet de diminuer les symptômes de tavelure. Soit le Soufre améliore l'efficacité du Bicarbonate, et/ou vice-versa. Creemers P. *et al.* (2008) remarquent que le Bicarbonate de potassium peut être utilisé pour lutter contre la tavelure lors des infections de sévérité faible. Mais cette molécule peut difficilement être intégrée dans une stratégie de lutte qui utilise des fongicides chimiques, à cause de son efficacité limitée.

Ce qui a pu être observé, c'est l'efficacité décroissante du Bicarbonate + Soufre lorsque le traitement est réalisé tard après le début de l'infection. Le traitement Post-infection 400-600 DH peut être considéré comme peu utile face aux efficacités des deux autres Post-infections. Il peut donc être supprimé des expérimentations futures.

Le **Kumulus** a une efficacité similaire en Protection et en Germination, et semble baisser en Post-infection. Il serait intéressant de le tester seul en Post-infection 200-400 DH. D'après les remarques apportées au paragraphe III.2, il est plutôt conseillé d'utiliser ce fongicide en Protection. Dans la profession, le soufre est d'abord utilisé pour lutter contre le blanc du pommier. Cette maladie, longtemps considérée comme secondaire au Québec, montre des cas de sévérité de plus en plus importants, notamment à cause de l'abandon de certains fongicides (Phillion V., 2013). Ces essais montrent que l'efficacité partielle du soufre sur la tavelure ne doit pas être sous-estimée.

Une des substances actives de **Inspire Super**, le difénoconazole, a une action en protection et en curatif (Dahmen H. *et al.*, 1992). Son action en protection est difficilement analysable, car Inspire Super est appliqué en combinaison avec d'autres traitements (modalité C).

En revanche, en Post-infection 200-400 DH (modalité AA), seul ce produit est appliqué. Les mêmes auteurs ont montré que le difénoconazole assure une efficacité totale sur la tavelure lorsqu'il est appliqué au maximum 3 jours après infection. L'accumulation de 400 DH est généralement atteinte au bout de 1 à 2 jours. Or, même si ce traitement a été le plus efficace des traitements testés lors de cette étude, des symptômes de tavelure ont été observés. Le difénoconazole est un triazole de la famille des DMI (demethylase inhibitors), sujets à l'apparition de cas de résistance, ou au moins à une sensibilité moindre (Cox K. D., 2009).

Ces cas ne signifient pas pour autant que les souches résistantes vont se disperser. Une stratégie de traitement mêlant des fongicides de familles différentes suffit à limiter ce phénomène. C'est l'un des avantages procurés par Inspire Super. Contrairement au fongicide Inspire qui est homologué au Canada, Inspire Super (en cours d'homologation) est un mélange de deux substances actives ayant des modes d'action différents (Tableau I).

Dans la même logique, le **programme de traitement C** qui se justifie d'abord par le choix des produits en fonction du stade phénologique du pommier, permet d'utiliser des fongicides qui ont des cibles biochimiques différentes.

En ce qui concerne le **Polyram**, il a une action multi-site de contact qui limite aussi l'apparition de résistances, mais a une efficacité inférieure aux uni-sites systémiques.

Adjuvants

Le **pinolène**, qui est supposé améliorer le dépôt d'un produit sur la feuille, n'améliore pas sensiblement l'efficacité du Bicarbonate. Il ne montre pas d'efficacité par rapport au témoin non traité. Cette molécule semble peu utile pour lutter contre la tavelure.

L'**huile**, qui a pour effet d'améliorer l'adhérence d'un produit sur la feuille, améliore légèrement l'efficacité du Bicarbonate. Mais cet adjuvant pose problème, car il est incompatible avec certains autres fongicides comme le Soufre ou le Captan (Phillion V., *communication personnelle*). Elle procure au Bicarbonate une efficacité intermédiaire entre le Bicarbonate appliqué seul et les bouillies à base de Bicarbonate + Soufre. Son rôle pour l'adhésion du Bicarbonate étant reconnu pour lutter contre le blanc (Tremblay L., 2001), l'huile peut être intéressante à utiliser dans le cadre de stratégies de traitements pour lutter contre divers ravageurs et maladies du pommier. La période optimale d'application n'est pas encore maîtrisée pour la tavelure.

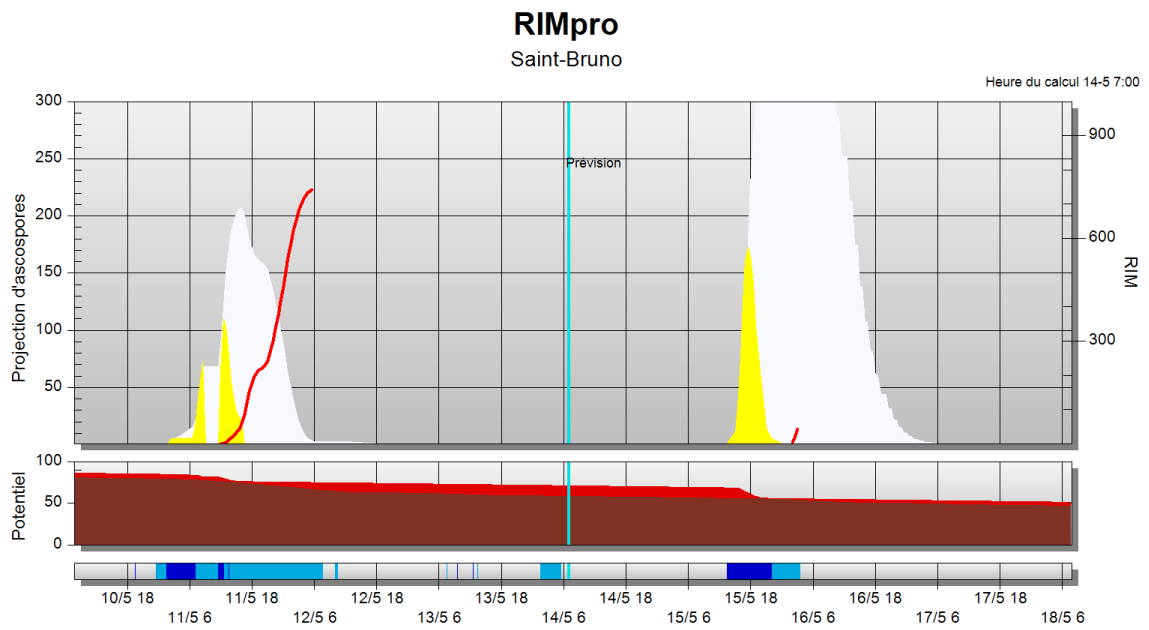


Figure 20 : Simulations RIMpro montrant l'infection du 11 mai 2013 et l'absence de fenêtre de germination pour ce cas (source IRDA)

Autres substances

Modifier les paramètres physiques de la feuille ne semble pas fonctionner. Le cas du **Moisturin** montre en effet une efficacité semblable au témoin non traité. Ce produit n'a donc pas d'utilité pour lutter contre la tavelure.

Le **Phosphite**, en tant que stimulateur des défenses de la plante, ne semble pas accroître l'efficacité du Bicarbonate + Soufre appliqué en Post-infection 200-400 DH. Néanmoins, une incertitude demeure à cause de l'écart-type élevé du traitement Bicarbonate + Soufre de la Post-infection 200-400 DH. Une étude pluriannuelle pourrait permettre de conclure précisément sur le rôle de cette molécule.

Le **Kaolin** n'améliore pas l'efficacité d'une bouillie à base Bicarbonate + Soufre, mais il ne réduit pas non plus son efficacité. De plus, cette argile est utilisée pour protéger le pommier contre d'éventuelles attaques d'acariens ou de pucerons, comme le puceron lanigère (Chouinard G. *et al.*, 2013). Comme pour l'huile, le kaolin peut avoir son utilité dans le cadre d'une stratégie globale de protection des pommiers contre les ravageurs et les maladies.

III.5. Prises de décision

Le protocole expérimental mis en place tente de prendre en compte tous les cas possibles d'enchaînements d'évènements pluvieux.

Pour la stratégie **Protection** (traitements B à F), la prise de décision est relativement simple à définir. Des périodes pendant lesquelles beaucoup de traitements doivent être appliquées peuvent modifier la date des traitements Protection, mais cette stratégie reste très flexible si le feuillage est sec et qu'aucune pluie n'est prévue.

La **Germination** est la stratégie la plus délicate. Elle nécessite de placer le traitement à l'heure optimale pour maximiser son efficacité. Ce moment est appelé « fenêtre de germination », car il faut attendre d'avoir un maximum d'ascospores vivantes déposées sur le feuillage, mais sans que l'infection ait débutée. Cette fenêtre se situe assez régulièrement la nuit, et parfois, l'infection débute avant que toutes les spores viables ne soient sur le feuillage (Figure 20). Dans ce cas, selon le protocole, le traitement n'est pas réalisé en Germination, mais en Post-infection 200-400 DH avec du Bicarbonate + Soufre. Ceci introduit un biais dans l'expérimentation. Si la comparaison entre les différentes modalités de la stratégie Germination reste possible, il devient difficile d'isoler l'effet des traitements Germination des Post-infection pour les comparer aux autres stratégies.

Pourtant, l'analyse du traitement Protection bio (page 18) suggère que le soufre a une efficacité en curatif lorsqu'il est associé au Bicarbonate. Il serait intéressant d'utiliser les mêmes bouillies des traitements Germination en Post-infection, lorsque les conditions ne permettent pas d'effectuer l'application en Germination.

La **Post-infection** est une stratégie relativement simple à mettre en place. Il suffit de récupérer des moyennes horaires de température pour estimer le moment le plus opportun pour le traitement. Parfois, la période optimale se situe la nuit, mais comme pour la Protection, cette stratégie est relativement flexible. Toutefois, des variations entre les prévisions et les températures mesurées peuvent décaler l'heure de traitement initialement prédite.

Enfin, le **traitement N**, qui combine deux stratégies (Protection et Post-infection 200-400 DH), a posé quelques difficultés. En effet, le 20 mai 2013, un traitement Post-infection 200-400 DH a été réalisé vers 9h pour traiter l'infection du 20 mai de 2h du matin (Tableau IV). Mais ce même jour, un traitement Protection a été prévu en début d'après-midi car des pluies étaient annoncées pour la soirée. Le traitement N en Protection a donc été appliqué le lendemain pour éviter de traiter deux fois dans la même journée.

De même, pour l'infection du 26 mai de 7h, un traitement Post-infection a été réalisé le même jour vers 10h30. Un traitement Protection a aussi été prévu ce même jour, mais les prévisions météorologiques ne permettaient pas de reporter le traitement Protection au lendemain. Le 27 mai, deux traitements ont été appliqués pour la modalité N (Tableau II).

Ces deux cas illustrent la difficulté de mettre en place des combinaisons de stratégies lorsque chacune des stratégies a été définie indépendamment des autres. Ainsi, il serait intéressant de rajouter des conditions de traitements qui tiennent compte d'éventuels résidus de pesticides encore présents sur le feuillage. Cette remarque est aussi valable lorsque les infections se succèdent rapidement (et donc les traitements), comme pour la période du 21 au 27 mai.

Conclusion

L'objectif de cet essai en plein champ était de comparer l'efficacité de différents fongicides, appliqués selon plusieurs stratégies, sur la tavelure. Cette expérimentation de type exploratoire a fait appel à un outil prévisionnel actuellement au stade de validation au Québec : RIMpro. Les prévisions RIMpro permettent de donner un bon aperçu des éjections et infections de tavelure si aucun traitement n'est réalisé. En ce sens, RIMpro facilite beaucoup la prise de décision, mais encore faut-il employer des pesticides efficaces et appliqués au stade critique du cycle de la tavelure.

L'efficacité des fongicides varie beaucoup selon la ou les substances actives qu'ils contiennent, leurs modes d'action biochimique, et la stratégie employée. Les fongicides de type uni-site (Inspire Super, Allegro et Fontelis) sont les plus efficaces. Les conclusions sont plus mitigées pour les autres traitements. Le Bicarbonate par exemple semble efficace seulement lorsqu'il est associé à du Soufre, et cette efficacité est d'autant plus grande que le traitement est appliqué tôt après le début de l'infection. *A contrario*, d'autres traitements qui ne contiennent aucun fongicide (Moisturin, Moisturin+NCC) sont inefficaces.

Pour les stratégies, la Protection et la Post-infection montrent des résultats très intéressants, et sont relativement simples à mettre en place. Quant à la stratégie Germination, elle est très contraignante, et nécessite des recherches plus poussées afin de trouver une formulation qui sera particulièrement efficace pour éviter l'infection des feuilles.

La recherche de l'efficacité optimale pour lutter contre la tavelure repose donc sur l'utilisation de fongicides appliqués au moment où ils seront les plus efficaces. Au-delà des multiples combinaisons de traitements possibles, la principale difficulté de la lutte chimique est de prévoir des événements qui restent invisibles à nos yeux jusqu'à l'apparition des symptômes. Ces événements, qui sont simulés par RIMpro, sont de mieux en mieux perçus. Mais les nouvelles problématiques et interrogations suscitées par cet essai montrent qu'il reste difficile de prévoir précisément les éjections d'ascospores, les infections et leur sévérité, et par conséquent la période optimale de traitement.

Chaque année de production est unique et ne peut être appréhendée de la même façon qu'une autre. Cet essai pluriannuel et la validation de RIMpro dans les conditions environnementales du Québec sont essentiels pour que le producteur puisse adapter et optimiser ses stratégies de lutte contre la tavelure.

Bibliographie

Agrios G.N. (2005). *Plant Pathology*. 5th ed., Elsevier Academic Press, Burlington, 922 p.

Biggs A. R., Sundin G. W., Rosenberger D.A., Yoder K.S., Sutton T.B. (2010). Relative susceptibility of selected apple cultivars to apple scab caused by *Venturia inaequalis*. *Plant health progress*. 11 p.

Brent K.J. (1995). *Fungicide Resistance in Crop Pathogens: How can it be managed?*. Global Crop Production Federation. Brussels. 48 p.

Chouinard G., Cormier D. (2013). Production fruitière intégrée 2013-14. Poster PFI. 1 p.

Cox K.D., Villani S.M. (2009). Apple scab fungicide resistance in the Northeastern United States: Prevalence and Practical Resistance. Paper presented Nov. 19-20 at the 2009 Cumberland Shenandoah Fruit Workers Conference, Winchester VA. 10 p.

Creemers P., Van Laer S., Van Mechelen A., Vorstermans B., Hauke K. (2008), Evaluation of the users value of salts against apple scab and powdery mildew for fruit production. In: Boos M, (Ed.) *Ecofruit - 13th International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing*. pp. 76-81.

Dagnelie P. (2012). *Principes d'expérimentations : planification des expériences et analyse de leurs résultats*. Les presses agronomiques de Gembloux. Gembloux. 413 p.

Dahmen H., Staub T. (1992). Protective, curative and eradicant activity of difenoconazole against *Venturia inaequalis*, *Cercospora arachidicola* and *Alternaria solani*. *Plant disease* 76:774-777.

Gadoury D. M., MacHardy W. E. (1982). A model to estimate the maturity of ascospores of *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* 72:901-904.

Gadoury D. M., Seem R. C., MacHardy W. E., Wilcox W. F., Rosenberger D. A., Stensvand A. (2004). A comparison of methods used to estimate the maturity and release of ascospores of *Venturia inaequalis*. *Plant Disease* 88:869-874.

Giraud M. (2009). La tavelure du pommier : Comment mesurer les projections d'ascospores?. *Infos-Ctifl* 253:34-39

Leca A. (2011). Contribution à l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier. Thèse de Doctorat Physique de l'Environnement. Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand. 327 p.

Luciana P., Pascale E., Isabelle N., Tania L. E., Noëllie B., Frédérique D. (2008). Can *Venturia inaequalis* populations show a reduced sensitivity to a multisite fungicide? The case study of Captan in French orchards. In Cross J., Brown M., Fitzgerald J., Fountain M., Yohalem D. (Ed). *IOBC - Working Groups "Integrated fruit protection in fruit crops"* - Proceedings of the 7th International Conference on Integrated Fruit Production. 574 p.

MacHardy W. E. (1996). *Apple scab: biology, epidemiology, and management*. APS Press. St. Paul. 545 p.

Philion V. (2009). Anatomie d'une infection de la tavelure selon RIMpro. Bulletin d'information No 03 - Réseau d'avertissements phytosanitaires - Pommier. 4 p.

Philion V. (2013). Les maladies en noir et blanc (tavelure et blanc). Bulletin d'information No 05 - Réseau d'avertissements phytosanitaires - Pommier. 3 p.

Smeesters E., Chouinard G., Gagnon S. (2001). *Méthodes alternatives à la lutte chimique en pomiculture – Principales techniques applicables au Québec*. Bibliothèque nationale du Québec. 40 p.

Tremblay L. (2001). Le bicarbonate, fongicide de l'avenir ?. *Québec Vert*. IQDHO. pp. 58-61

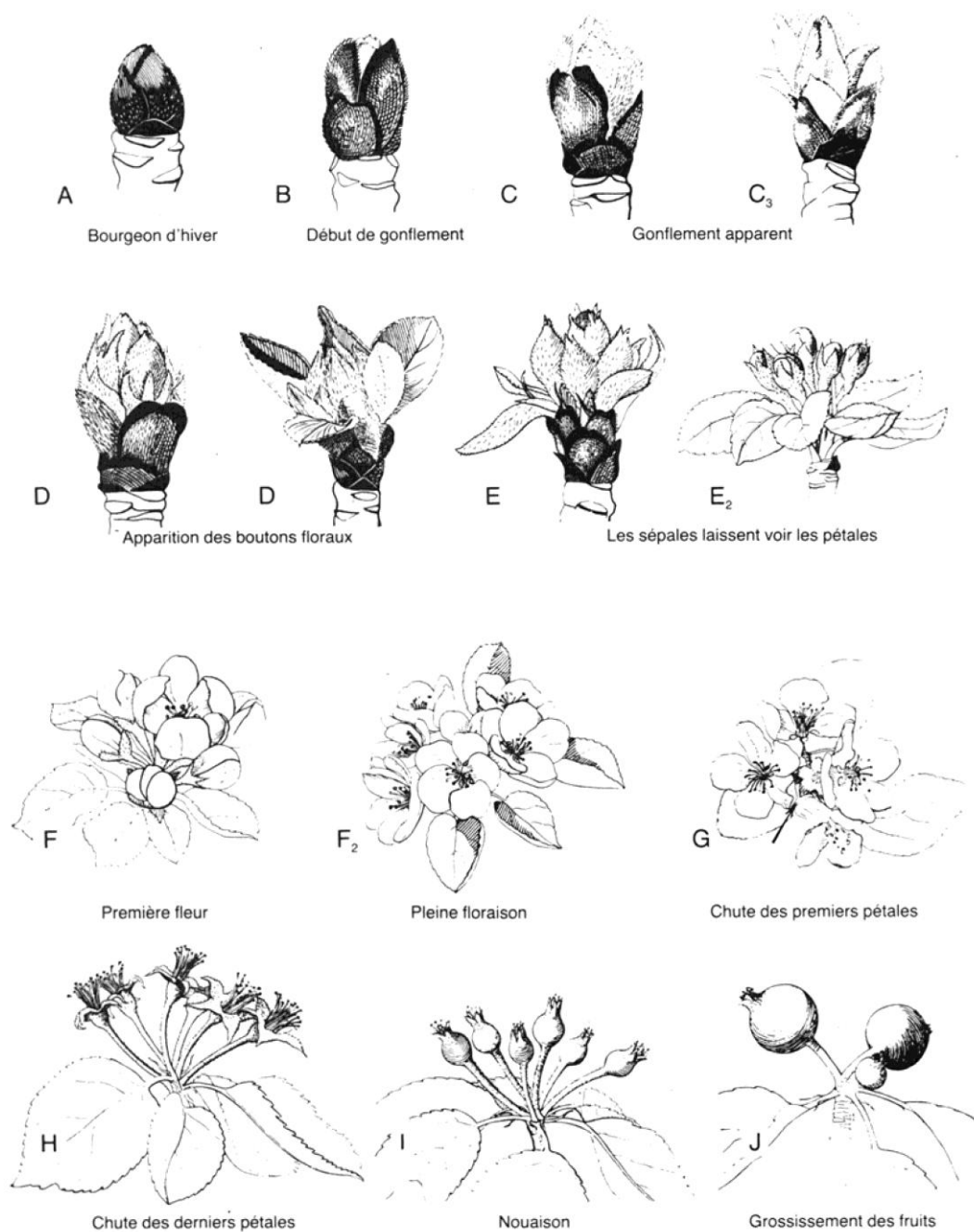
Liste sitographique :


ARLA. (2013). Recherche dans les étiquettes de pesticides. <http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pest/registrant-titulaire/tools-outils/label-etiq-fra.php> (consulté le 05/08/2013)

FRAC. (2013). FRAC Code List © 2013: Fungicides sorted by mode of action (including FRAC Code numbering). http://www.frac.info/publication/anhang/FRAC_Code_List_2013-update_April-2013.pdf (consulté le 04/08/2013)

ANNEXES

Annexe I : stades phénologiques du pommier (d'après Fleckinger)



	<p>Diplôme / Mention : Master 2 Sciences Technologie Santé, Mention Biologie et Technologie du Végétal</p> <p>Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)</p> <p>Parcours : Productions Végétales Spécialisées (PVS)</p> <p>Option : Filières de l'horticulture et végétal urbain</p>
<p>Auteur : Arnaud Baudin</p> <p>Date de naissance : 18/12/1987</p>	<p>Organisme d'accueil : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA)</p> <p>Adresse : 335 chemin des Vingt-Cinq Est Saint-Bruno-de-Montarville J3V 0G7 Canada (QC)</p> <p>Maître de stage : Vincent Phillon, chercheur en phytopathologie</p>
<p>Nb pages : 25 Annexe(s) : 1</p>	
<p>Année de soutenance : 2013</p>	
<p>Titre français : Lutte chimique contre la tavelure du pommier : efficacité de différents fongicides et stratégies de traitements</p> <p>Titre anglais : Chemical control against apple scab: effectiveness of various fungicides and treatment strategies</p>	
<p>Résumé : La tavelure (<i>Venturia inaequalis</i>) est une maladie du pommier (<i>Malus x domestica</i>) qui cause d'importants dégâts au Québec. Face à la diminution du nombre de pesticides homologués, il est nécessaire d'utiliser des fongicides efficaces et appliqués au bon moment. Le logiciel prévisionnel RIMpro permet de faciliter cette prise de décision. Dans cet essai, plusieurs fongicides et substances d'intérêt sont testés pour comparer leurs efficacités sous différents programmes de lutte. Les fongicides uni-sites (Inspire Super, Fontelis, Allegro) sont les plus efficaces. Certains peuvent être utilisés en préventif et en curatif. Les fongicides multi-sites (Polyram, soufre) ont une efficacité respectable. Ils sont souvent utilisés en préventif. Le Bicarbonate de potassium est un sel qui est d'un certain intérêt pour lutter contre la tavelure. Il est le plus efficace lorsqu'il est associé au soufre, et lorsqu'il est appliqué peu de temps après une infection. Les stratégies de lutte développée à partir de RIMpro sont de mieux en mieux maîtrisées, notamment pour le préventif et le curatif. En revanche, la stratégie de traitement qui vise les ascospores déposées sur le feuillage juste avant leur pénétration dans la cuticule nécessite d'avantages de recherche.</p>	
<p>Abstract: Apple scab (<i>Venturia inaequalis</i>) is a disease of apple trees (<i>Malus x domestica</i>) causing severe damage in Quebec. With the decreasing number of registered pesticides, it is necessary to use effective fungicides applied at the right time. The forecast software RIMpro facilitates this decision. In this trial, several fungicides and substances of interest are tested to compare their effectiveness under various control programs. The single-site fungicides (Inspire Super, Fontelis, Allegro) are most effective. Some of them can be used as preventive and curative fungicides. Multi-site fungicides (Polyram, sulfur) have a respectable efficiency. They are often used as preventive. Potassium bicarbonate is a salt that is used to fight against scab. It is most effective when combined with sulfur, and when applied just after infection. The strategies developed from RIMpro are better controlled now, especially for preventive and curative applications. However, the strategy that aims ascospores deposited on the leaves just before they penetrate the cuticle requires more research.</p>	
<p>Mots-clés : tavelure, pommier, fongicide, lutte chimique, RIMpro</p> <p>Key Words : apple scab, apple, fungicide, chemical control, RIMpro</p>	