

JULIE BOUCHARD

**ÉPIDÉMIOLOGIE ET ÉVALUATION DE SYSTÈMES
PRÉVISIONNELS COMME OUTIL DE LUTTE RAISONNÉE
CONTRE LE BLANC (*SPHAEROTHECA MACULARIS*) CHEZ LE
FRAISIER À JOUR NEUTRE ET CONVENTIONNEL**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2008

Résumé

Il n'existe aucune étude sur l'épidémiologie du blanc du fraisier, *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae*, réalisée sous nos conditions. Ainsi, les objectifs de cette étude étaient de déterminer la sensibilité variétale et la résistance ontogénique au blanc des feuilles de fraisiers à jour neutre et conventionnels; de comparer des systèmes prévisionnels développés pour le blanc du fraisier et d'autres cultures; et d'étudier l'influence des conditions météorologiques sur la concentration des spores de blanc dans l'air. Ce projet a permis d'acquérir une meilleure connaissance du blanc, de valider et d'améliorer un système prévisionnel du blanc du fraisier basé sur son épidémiologie et sur les conditions climatiques du Québec. Les nouvelles connaissances permettront de mieux définir les fenêtres d'application de fongicides, ce qui pourrait permettre de réduire l'utilisation de ceux-ci en diminuant le nombre total d'applications, et par le fait même, les impacts économiques et environnementaux associés à la lutte contre cette maladie.

Avant-Propos

Ce mémoire est le résultat de longs efforts et je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Tout d'abord un merci spécial à ma directrice, docteure Odile Carisse, qui a su développer mon intérêt à la recherche un peu plus à chacune de nos rencontres. Sa passion et son dévouement à son travail m'ont permis de vouloir me dépasser à mon tour. Merci à mon co-directeur, Dr Daniel Dostaler, pour ses commentaires et ses conseils des plus utiles tout au long de ma rédaction. Sa capacité à toujours trouver le mot juste m'a permis de développer mon habileté à m'exprimer.

Je tiens également à remercier mon équipe de l'IRDA : Hélène Rousseau, grâce à qui j'ai pu participer à ce projet de recherche pour réaliser ma maîtrise, et Carl Boivin, qui a toujours été là pour m'orienter et me conseiller. Un merci spécial à Aline Germain, sans qui mes journées au champ n'auraient pas été aussi agréables, et à Vicky Poirier, qui a su m'aider efficacement durant un été et avec qui, en bonus, je me suis bien amusée!

Je voudrais aussi remercier Jean Coulombe, pour son dévouement au projet, sa précieuse aide sur le terrain et ses conseils d'agronome expérimenté.

J'ai aussi eu la chance de côtoyer l'équipe du laboratoire de phytopathologie du CRDH à Saint-Jean-sur-Richelieu, Annie, Daniel, Mathieu et Tristan, que je remercie d'avoir contribué de façon importante à ce projet et d'avoir répondu patiemment à mes questions. Un dernier merci à Karine Lessard pour son aide en statistiques.

Finalement, je ne pourrais passer à côté de ma famille, mes parents et mon mari, qui m'ont supportée, encouragée et soutenue durant ces dernières années. Merci pour votre patience et votre compréhension durant mes nombreuses années d'études. Sans vos bons mots lors de mes moments de découragement, je n'aurais pu avoir la satisfaction de terminer tout cela!

Table des matières

RÉSUMÉ.....	II
AVANT-PROPOS.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
CHAPITRE 1	
Introduction générale et revue bibliographique.....	1
1.1 La culture du fraisier.....	1
1.1.1 Maladies du fraisier.....	3
1.2 Le blanc du fraisier.....	4
1.2.1 Symptomatologie.....	4
1.2.2 Description de l'agent pathogène.....	5
1.2.3 Cycle évolutif et épidémiologie.....	6
1.3 Moyens de lutte.....	8
1.3.1 Lutte conventionnelle.....	8
1.3.1.1 Sensibilité variétale.....	8
1.3.1.2 Lutte chimique.....	10
1.3.2 Lutte raisonnée.....	12
1.3.2.1 Résistance ontogénique.....	12
1.3.2.2 Systèmes prévisionnels et indicateurs météorologiques.....	14
1.4 Problématique.....	15
1.5 Hypothèse et objectifs.....	16
CHAPITRE 2	
Sensibilité variétale au blanc et résistance ontogénique des feuilles de fraisier.....	17
Résumé.....	17
2.1 Introduction.....	18
2.2 Matériel et méthodes.....	19
2.2.1 Parcelles expérimentales.....	19
2.2.1.1 Sensibilité des cultivars.....	19
2.2.1.2 Résistance ontogénique des feuilles.....	20
2.2.2 Collecte des données.....	21

2.2.2.1 Sensibilité des cultivars.....	21
2.2.2.2 Résistance ontogénique des feuilles.....	22
2.2.3 Analyses statistiques.....	22
2.2.3.1 Sensibilité des cultivars.....	22
2.2.3.2 Résistance ontogénique des feuilles.....	24
2.3 Résultats.....	24
2.3.1 Sensibilité des cultivars.....	24
2.3.2 Résistance ontogénique des feuilles.....	29
2.4 Discussion.....	33
 CHAPITRE 3	
Systèmes prévisionnels du blanc du fraisier.....	37
Résumé.....	37
3.1 Introduction.....	38
3.2 Matériel et méthodes.....	40
3.2.1 Parcelles expérimentales.....	40
3.2.2 Traitements et critères de décision.....	41
3.2.2.1 Modèle de Gubler-Hoffman.....	41
3.2.2.2 Modèle de degrés jours (Carisse).....	45
3.2.3 Collecte des données	46
3.2.4 Analyses statistiques	47
3.3 Résultats.....	48
3.3.1 Intensité.....	48
3.3.2 Analyses de variance.....	51
3.3.3 Indice de risque.....	54
3.4 Discussion.....	57
 CHAPITRE 4	
Application de l'analyse par arbre de classification aux relations entre les conditions météorologiques et la concentration aérienne de conidies de <i>Sphaerotheca macularis</i> f. sp. <i>fragariae</i>, le blanc du fraisier, à l'Île d'Orléans.....	61
Résumé.....	61
4.1 Introduction.....	62
4.2 Matériel et méthodes.....	64
4.2.1 Parcelles expérimentales.....	64
4.2.2 Collecte des données.....	65
4.2.3 Analyses de données.....	66

4.3 Résultats.....	67
4.3.1 Concentration de conidies.....	67
4.3.2 Arbre de classification.....	69
4.4 Discussion.....	77
DISCUSSION GÉNÉRALE.....	81
CONCLUSIONS.....	84
BIBLIOGRAPHIE.....	86
ANNEXES.....	94

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Lien entre les cotes d'intensité de Viret et al. (1998) et le pourcentage de recouvrement du blanc sur les feuilles.....	22
Tableau 2.2. Paramètres résultant de la régression logistique de l'incidence des cléistothèces chez différents cultivars de fraisier pour les années 2006 et 2007 combinées.....	28
Tableau 2.3. Comparaison des sept stades de maturité (âge) des feuilles pour la Pmax du blanc du cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en 2007.....	31
Tableau 2.4. Comparaison des sept stades de maturité (âge) des feuilles pour la Pmax du blanc du cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en 2007.....	31
Tableau 3.1. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraisier chez le cultivar à jour neutre 'Seascape' en 2006 (L'Acadie) selon cinq régions.....	42
Tableau 3.2. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraisier chez le cultivar conventionnel 'Jewel' en 2007 (Frelighsburg) selon cinq régions.....	43
Tableau 3.3. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraisier chez le cultivar conventionnel 'Seascape' en 2007 (Frelighsburg) selon cinq régions.....	43
Tableau 3.4. Initiation des applications de fongicides en fonction de l'indice de risque (pression de maladie) (Gubler et al. 1999) du blanc du fraisier.....	45
Tableau 3.5. AUDPC, rendement et nombre de traitements fongicides en fonction des systèmes prévisionnels (régies de traitements) chez le cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en 2006 à l'Acadie et en 2007 à Frelighsburg.....	53
Tableau 3.6. AUDPC, rendement et nombre de traitements fongicides en fonction des régies de traitements chez le cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en 2007 à Frelighsburg.....	53
Tableau 4.1. Variables météorologiques construites pour l'analyse par arbre de classification pour la prévision de la concentration de conidies du blanc du fraisier à l'Île d'Orléans en 2006-2007.....	68
Tableau 4.2. Corrélations entre les catégories de la concentration dans l'air de conidies de <i>S. macularis</i> f. sp. <i>fragariae</i> en log10 et les variables météorologiques significatives de l'analyse par arbre de classification.....	73
Tableau 4.3. Matrice de validation de l'arbre de classification: taux de prédiction des catégories de concentration dans l'air de conidies du blanc de fraisiers conventionnels ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.....	76

Liste des figures

- Figure 2.1.** Moyennes des sommes des aires sous la courbe de progression (AUDPC) du blanc du fraisier chez six cultivars pour les saisons 2006 (A) et 2007 (B).....26
- Figure 2.2.** Incidence des cléistothèces du *F. macularis* f. sp. *fragariae* sur les feuilles de six cultivars de fraisiers pour les années combinées 2006 (L'Acadie) (jour julien 289) et 2007 (Frelighsburg) (jour julien 275).....27
- Figure 2.3.** Moyennes (%) d'intensité du blanc en fonction de l'âge de la feuille chez les cultivars de fraisier 'Jewel' et 'Seascape' en 2007 (Frelighsburg).....30
- Figure 2.4.** Valeurs moyennes observées de la proportion du maximum (Pmax) de l'intensité du blanc et valeurs prédites par le modèle en fonction du stade de maturité (âge) des feuilles pour les cultivars de fraisier 'Jewel' (conventionnel) et 'Seascape' (à jour neutre) en 2007 (Frelighsburg).....32
- Figure 3.1.** Progression de l'intensité du blanc chez le fraisier à jour neutre 'Seascape', selon cinq régies de traitements fongicides en 2006 à l'Acadie (A) et en 2007 à Frelighsburg (B).....50
- Figure 3.2.** Progression de l'intensité du blanc chez le fraisier conventionnel 'Jewel', selon cinq régies de traitements fongicides en 2007 à Frelighsburg.....51
- Figure 3.4.** Indice de risque du blanc de Gubbler-Hoffman chez le cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en fonction des jours juliens en 2006 à l'Acadie et en 2007 à Frelighsburg.....55
- Figure 3.5.** Indice de risque du blanc de Gubbler-Hoffman chez le cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en fonction des jours juliens en 2007 à Frelighsburg.....56
- Figure 4.1.** Variation du nombre de conidies du blanc du fraisier dans l'air (conidies/m³/heure), chez le cultivar conventionnel 'Jewel' (A) (ferme Onésime Pouliot) et du cultivar à jour neutre 'Seascape' (B) (Polyculture Plante), à l'Île d'Orléans en 2006.....71
- Figure 4.2.** Variation du nombre de conidies du blanc du fraisier dans l'air (conidies/m³/heure), chez le cultivar conventionnel 'Darselect' (ferme Onésime Pouliot) (A) et chez le cultivar à jour neutre 'Seascape' (Polyculture Plante) (B) à l'Île d'Orléans en 2007....72
- Figure 4.3.** Arbre de classification des règles de décision pour la prédiction de risque du blanc chez le fraisier conventionnel ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.....74
- Figure 4.4.** Contribution relative (%) des variables météorologiques de l'analyse par arbre de classification pour la prédiction du risque du blanc chez le fraisier conventionnel ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.....75

Chapitre 1

Introduction générale et revue bibliographique

1.1 La culture du fraisier

Le fraisier cultivé fait partie de la famille des rosacées et est issu d'un croisement entre plusieurs espèces du genre *Fragaria* comme *Fragaria vesca* L. (fraisier des bois), *F. virginiana* Duch. (fraisier de Virginie), *F. chiloensis* (L.) Mill. (fraisier du Chili) et *F. moschata* Duch. (capronier). La culture de *Fragaria vesca* a été initiée par les Romains en 200 av. J.-C. et c'est depuis 1835 que le fraisier est cultivé en Amérique du Nord (Anonyme, 2005). Le fraisier moderne, *Fragaria X ananassa* Duch., est en fait le croisement entre *F. virginiana* et *F. chiloensis*.

Le fraisier se cultive sous climat tempéré. En revanche, dans les pays nordiques tels que le Canada, la saison de culture est particulièrement courte et les cultivars doivent y être adaptés. Par conséquent, des programmes d'amélioration génétique ont été mis en oeuvre afin de pallier aux besoins des provinces de l'est, par exemple. Au Canada, la fraise occupe la quatrième place des productions fruitières après la pomme, le bleuet et le raisin, avec une production annuelle de 19 339 tonnes en 2006, cultivée sur 3 177 ha (Anonyme, 2008b; Khanizadeh et DeEll, 2005). Le Québec et l'Ontario produisent près de 70 % de la production nationale, soit 36 % et 32 % respectivement, suivis de la Colombie-Britannique (15 %), la Nouvelle-Écosse (7,9 %), le Nouveau-Brunswick (2,8 %) et le Manitoba (2,7 %). L'Alberta, l'Île-du-Prince-Édouard, Terre-Neuve et la Saskatchewan se partageant les 3 % restant (Anonyme, 2005). On dénombre au Québec plus de 700 producteurs exploitant 2 300 ha de fraisiers, ce qui représente un chiffre d'affaires annuel d'environ 16 millions de dollars. Avec ces recettes,

de la fraise se place au troisième rang des productions fruitières québécoises, derrière la pomme et le bleuet (Anonyme, 2006).

Il existe une grande diversité de cultivars distincts par le type de production (fraisiers d'été ou conventionnels; fraisiers d'automne ou à jour neutre), la morphologie, la physiologie, la qualité du fruit et la résistance aux maladies et aux ravageurs. Parmi les cultivars les plus prisés par les producteurs québécois et les consommateurs, notons entre autres chez le fraisier d'été, les cv. Kent (enregistré en 1981) et Jewel (1985) qui se retrouvent dans plus de 50 % des fraisières (Anonyme, 2006). Mentionnons aussi les cv. Bounty (1972), Annapolis (1984), Chambly (1990), Cavendish (1991), Darselect (1997) et Yamaska (1998). Chez le fraisier à jour neutre, on retrouve les cv. Seascape (1991), qui représente plus de 90 % de la production, et Aromas (enregistré en 1999) aussi populaire (Anonyme, 2006).

La fraise d'été, ou fraise conventionnelle, est récoltée à la fin du mois de juin. Cette culture intensive est effectuée selon différents systèmes: production annuelle sous plastique, production pérenne en rangs nattés, production pérenne en haute densité ou production sous tunnels plastiques. En revanche, tous ces systèmes n'ont pas les mêmes impacts environnementaux. Au Québec et dans l'est de l'Amérique du Nord, le système le plus répandu est la production pérenne en rangs nattés. Elle comporte aussi moins de répercussions sur les ressources et la qualité des sols que la production annuelle sous plastique, mais est aussi moins productive (Khanizadeh et DeEll, 2005). Le principe de la plantation en rangs nattés consiste à planter au printemps des plants mères selon un espacement (sur le rang) et un écartement (entre les rangs) qui permettent la production de plants filles par les stolons au cours de la saison (Anonyme, 2008a). La première récolte se fera alors l'année suivant l'implantation, puis le champ produira pendant deux ou trois saisons. Le paillis de paille entre les rangs est très répandu pour diminuer

le contact des fruits avec le sol, réprimer les mauvaises herbes et faciliter l'autocueillette.

Les fraisiers d'automne, ou fraisiers à jour neutre, ont une floraison indifférente à la photopériode. Ainsi, les fraisiers à jour neutre produisent des fleurs et des fruits sur une période beaucoup plus longue que les fraisiers conventionnels. Le fraisier à jour neutre permet aux producteurs du Québec d'être compétitifs sur le marché d'importation en provenance des États-Unis, du Chili et du Mexique puisque la première récolte se fait en juillet, pour s'étendre jusqu'au mois d'octobre. Les cultivars à jour neutre, aussi appelés variétés remontantes, sont habituellement cultivés sur butte avec un paillis de plastique et une irrigation par un système goutte-à-goutte (Anonyme, 2005; Khanizadeh et DeEll, 2005).

1.1.1 Maladies du fraisier

En ce qui a trait aux principales maladies fongiques du fraisier, l'amélioration génétique de certains cultivars a permis de leur conférer une résistance à une ou plusieurs maladies. Malgré cela, la lutte aux principales maladies du fraisier reste complexe. Notons parmi celles-ci, les maladies des racines causées par des organismes telluriques : la verticilliose (*Verticillium* spp.) et la stèle rouge (maladie des racines rouges) (*Phytophthora fragariae* C.J. Hickman); et les diverses pourritures du fruit : la pourriture grise (*Botrytis cinerea* Pers. ex Fr.), la pourriture amère (*Phytophthora cactorum* (Lebert & Cohn) J. Schröt.) et l'antracnose (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds). Puis, les maladies foliaires, la tache commune (*Mycosphaerella fragariae* (Tul.) Lindau), la tache pourpre (*Diplocarpon earlianum* (Ellis & Everh.) F. A. Wolf), une maladie bactérienne (la tache angulaire - *Xanthomonas fragariae* - Urbain, 2006), et finalement, le blanc du fraisier (*Sphaerotheca macularis* (Wallr. : Fries) Jacz. f.

sp. fragariae Peries) qui est en recrudescence dans les fraisières du Québec depuis plusieurs années (Couture *et al.* 2003; Lacroix, 2005).

1.2 Le blanc du fraisier

Le blanc du fraisier, causé par *S. macularis* f. *sp. fragariae*, est l'une des grandes préoccupations des producteurs de fraises et il est rapporté partout dans le monde. Son importance est due entre autres au fait que *S. macularis* peut infecter toutes les parties du plant : feuilles, pétioles, fleurs, fruits verts ou mûrs et stolons. Des infections foliaires de forte intensité réduisent la photosynthèse et peuvent conduire à des nécroses et entraîner la chute des feuilles (Maas, 1998).

1.2.1 Symptomatologie

Les folioles des feuilles infectées s'enroulent vers le haut en forme de cuillère et un duvet blanc constitué de mycélium, de conidiophores et de conidies apparaît principalement sur la surface inférieure (Maas, 1998; Peries, 1962a). Des lésions sporulantes peuvent aussi être observées à l'occasion sur la surface supérieure des feuilles de certains cultivars. Le blanc peut aussi se trouver sur les fleurs, les pédoncules, les stolons et les fruits verts ou rouges (Maas, 1998). Les fruits infectés deviennent durs, secs, recouverts de blanc et impropres à la consommation (Maas, 1998). Les symptômes sur les feuilles peuvent aussi se manifester par des taches de dimensions irrégulières avec une coloration passant du pourpre au brun sur la surface supérieure des folioles (Maas, 1998 ; Urbain, 2008).

1.2.2 Description de l'agent pathogène

Sphaerotheca macularis f. sp. *fragariae* (= *S. humili* (D. C.) Burr.; *Podosphaera aphanis* (Wallr.) U. Braun & S. Takam.) fait partie des Ascomycètes, de l'ordre des Érysiphales (Alexopoulos *et al.* 1996). Le *Sphaerotheca macularis* est associé au blanc chez 16 genres des plantes par Couture *et al.* (2003), dont le fraisier, le framboisier et le houblon. La forme spéciale (f. sp.) *fragariae* est spécifique du genre *Fragaria*; elle n'a été inoculée avec succès sous serre que chez une autre espèce, la potentille (*Potentilla fragariastrum*) (Peries, 1962a).

Le *S. macularis* est un épiphyte parasite obligatoire (Boesewinkel, 1980). Le mycélium des blancs reste entièrement superficiel sur l'épiderme des parties infectées de l'hôte et apparaît comme un duvet blanc. Il est constitué d'une abondance d'hyphes hyalins bien ancrés à l'aide d'haustoria qui pénètrent les cellules épidermiques de l'hôte afin d'y puiser leur énergie (Bélanger *et al.* 2002).

Les ascocarpes de ce champignon sont appelés cléistothèces. Ces structures apparaissent sous forme de petites pustules blanches, brunes ou noires (selon l'avancement de la maturité), visibles à l'œil nu sur les feuilles et les fruits (Viret *et al.* 1998). Les cléistothèces mesurent de 60 à 125 µm de diamètre. Ils possèdent de nombreux appendices (fulcres) bruns non ramifiés qui s'entremêlent avec les fulcres des cléistothèces adjacents. Chaque cléistothèce renferme un seul asque faisant de 50 à 60 µm de long par 55 à 80 µm de large et produit habituellement huit ascospores. Les ascospores ont une forme elliptique ou ovale et ont une dimension de 18 à 25 µm de long par 12 à 18 µm de large. Les spores asexuées appelées conidies sont produites en longues chaînes sur des conidiophores de type Oïdium. Elles ont une forme rappelant celle d'un baril (ovoïdes; Boesewinkel, 1980) et des granules de fibrosine peuvent être observés dans des solutions d'hydroxyde de potassium (Richard et Boivin, 1994). Hyalines, les conidies

mesurent 25 à 38 μm de long par 15 à 23 μm de large (Anonyme, 1968; Jhooty et McKeen, 1962).

1.2.3 Cycle évolutif et épidémiologie

S. macularis f. sp. *fragariae* ne survit que partiellement sur du matériel végétal gelé (Viret *et al.* 1998). Dans les régions où l'hiver est peu rigoureux, *S. macularis* hiverne sous la forme de mycélium sur les feuilles infectées ou dans la couronne du fraisier. Ainsi, les infections primaires au printemps pourraient être causées par des conidies, ou des ascospores libérées des cléistothèces matures (Viret *et al.* 1998; annexe A.1). En plus d'être des structures de reproduction, les cléistothèces pourraient également constituer des formes de conservation du *S. macularis* (Peries, 1962a; Rügner *et al.* 2002). En revanche, le rôle des cléistothèces comme source primaire des infections au printemps est peu documenté et les résultats des observations faites sur le sujet varient selon les études (Cortesi *et al.* 1995; Peries, 1962a).

D'après Peries (1962a), les températures optimales pour l'infection, la croissance et la sporulation du blanc se situent entre 18°C et 22,5°C, puis une diminution rapide du développement est observée entre 25°C et 30°C (Miller *et al.* 2003). L'infection débute à 5°C. Par la suite, entre 5°C et 15°C, le mycélium croît lentement jusqu'à ce que la température atteigne l'optimum de croissance (entre 18 et 22,5 °C) où la croissance se fera plus rapidement. De plus, la température quotidienne moyenne doit s'élever à plus de 12°C pour qu'il y ait présence de conidies dans l'air (Blanco *et al.* 2004). Il n'y a pas de sporulation entre 5°C et 13°C, tandis qu'à 15°C, celle-ci peut être observée environ cinq jours après l'infection (Peries, 1962a). Par ailleurs, une augmentation de la température quotidienne moyenne entraîne une augmentation de la concentration de conidies

dans l'air pour atteindre un pic à 15°C entre 13h00 et 15h00 (Blanco *et al.* 2004). Pour ce qui est de la germination des conidies, l'optimum de température s'approche de 20°C (Miller *et al.* 2003).

L'humidité relative influence la germination des conidies de blanc. Pour ce qui est du blanc de la vigne (*Uncinula necator*), l'incidence et l'intensité de la maladie augmentent avec une hausse de l'humidité pour atteindre un maximum à 85 % d'humidité relative (Carroll et Wilcox, 2003). Pour *S. macularis*, la même corrélation est rapportée : une humidité relative élevée est requise pour la germination des conidies et une fluctuation de celle-ci est nécessaire pour la libération des conidies (Blanco *et al.* 2004). Le taux de germination des conidies est maximal à une humidité relative se situant entre 97 % et 100 %, puis décroît brusquement lorsque l'humidité se situe aux alentours de 90 % (Jhooty et McKeen, 1965; Peries, 1962a). Par ailleurs, Miller *et al.* (2003) rapportent que la germination des conidies n'a jamais dépassé 25 % avec un taux d'humidité de 100 %. Par contre, il a aussi été observé que les conidies étaient capables de germer sous des conditions beaucoup plus sèches, soit jusqu'à 8 % d'humidité relative avec un taux de germination de 7 % (Jhooty et McKeen, 1965).

Malgré des conditions idéales de température et d'humidité, le développement du blanc peut être inhibé par la présence d'eau libre sur les feuilles causée par la pluie ou la rosée. En effet, il existe une corrélation négative entre la concentration de conidies dans l'air et l'humidité relative et la pluie (Blanco *et al.* 2004). La pluie a comme effet de délayer les conidies de l'air et pourrait inhiber la sporulation à la surface des feuilles (Blanco *et al.* 2004).

1.3 Moyens de lutte

D'une part, la lutte conventionnelle au blanc du fraisier est basée sur la résistance génétique des cultivars et sur la lutte chimique (Urbain, 2008). D'autre part, la résistance ontogénique et les systèmes prévisionnels caractérisent la lutte raisonnée contre le blanc. En effet, l'efficacité de la lutte au blanc est affectée par la résistance génétique et ontogénique des cultivars (Amsalem *et al.* 2006), le type de cultivar (type conventionnel ou à jour neutre; Urbain, 2008) et les produits phytosanitaires (fongicides et produits biologiques; Urbain, 2008). Urbain (2007) estime aussi que la rénovation (rajeunissement) des fraisiers, par le fauchage du vieux feuillage, peut contribuer à réduire l'intensité des maladies du feuillage, dont le blanc. Influencée par la température et l'humidité (Miller *et al.* 2003), la lutte au blanc du fraisier peut être adaptée en fonction de l'année d'implantation et de l'année de récolte (Urbain, 2008), d'où l'intérêt de la lutte raisonnée contre le blanc par le développement de systèmes prévisionnels et la prise en compte de la résistance ontogénique.

1.3.1 Lutte conventionnelle

1.3.1.1 Sensibilité variétale

Dans l'optique de mieux réprimer la maladie, il est essentiel de connaître la sensibilité variétale des fraisiers contre le blanc. Des observations au champ indiquent que certains cultivars sont très sensibles au blanc (Nelson *et al.* 1996). L'utilisation de cultivars moins sensibles est beaucoup plus économique que les moyens de lutte chimiques conventionnels (Hsu *et al.* 1969). Chez les cultivars à jour neutre, la production de fruits s'étend sur une période de huit à dix semaines durant laquelle les épisodes de blanc sont fréquents, et les applications de fongicides plus difficiles à programmer en fonction des récoltes fréquentes. D'où l'intérêt accru des cultivars résistants ou peu sensibles au blanc (Simpson, 1987).

La première mention de différences de sensibilité au blanc entre variétés de fraisier a été faite il y a plus de 150 ans par Berkeley (1854, cité par Nelson *et al.* 1996). Puis, plusieurs études réalisées dans les années cinquante ont rapporté une différence de sensibilité de cultivars ou variétés de fraisier au blanc (Daubeny, 1959; Jhooty et McKeen, 1965; Mence et Hildebrandt, 1966, cités par Doster et Schnathorst, 1985; Miller et Waldo, 1957; Orchard et Van Adrichem, 1957; Peries, 1962b).

Les travaux de Peries (1962b) n'ont pas présenté d'évidence de races physiologiques chez *S. macularis* f.sp. *fragariae*. De même, Amsalem *et al.* (2004, cités par Amsalem *et al.* 2006) en Israël rapportent, suite à l'examen de sous-populations du blanc du fraisier par des outils moléculaires, l'absence de diversité génétique marquée chez *S. macularis* f. sp. *fragariae*. Davik et Honne (2005) parlent de résistance probablement polygénique et de l'érosion de la résistance au blanc du fraisier par de possibles nouvelles souches.

La différence de sensibilité entre les cultivars de fraisier pourrait être expliquée par des facteurs génétiques. Les gènes de résistance seraient récessifs chez certains cultivars et dominants chez d'autres (Daubeny, 1959). Par ailleurs, Doster et Schnathorst (1985) ont rapporté que la résistance d'un cultivar était corrélée avec la proportion de conidies de *S. macularis* incapables de pénétrer la surface de la feuille. De ce fait, l'épaisseur de la cuticule et des cellules épidermiques à la surface des feuilles jouerait un rôle de barrière physique (Mence et Hildebrandt, 1966, cités par Doster et Schnathorst, 1985; Peries, 1962b). Jhooty et McKeen (1965) ont aussi appuyé cette hypothèse. Ils ont observé une différence marquée de la sensibilité au blanc entre deux espèces de fraisiers sauvages, dont la plus résistante, *Fragaria chiloensis* présentait une cuticule sur la face supérieure de ses

feuilles jusqu'à sept fois plus épaisse que celle de l'espèce la plus sensible, *Fragaria ovalis* Wils. Il est aussi apparu que la face inférieure des feuilles de *F. chiloensis* était plus sensible que la face supérieure et présentait une cuticule beaucoup plus mince (Jhooty et McKeen, 1965). De plus, les différentes composantes de la cuticule auraient des effets inégaux sur la germination des spores de blanc, certaines la favorisant, d'autres l'inhibant.

1.3.1.2 Lutte chimique

La lutte contre le blanc du fraisier vise à éviter que les fruits soient infectés et à diminuer les pertes de rendement dues à une intensité élevée de blanc sur le feuillage. Par ailleurs, la lutte chimique doit aussi prendre en compte les types de cultivars utilisés, conventionnels ou à jour neutre (Simpson, 1987). Ainsi, dans les cas de hauts niveaux d'infection sur les feuilles et les fleurs et d'une perte de la qualité des fruits, l'utilisation régulière de fongicides est recommandée. En 2000, plus de 164 000 kg de fongicides ont été utilisés contre le blanc du fraisier aux États-Unis (Miller *et al.* 2003). En fait, le seul moyen de contrer efficacement cette maladie chez les cultivars sensibles seraient d'utiliser des transplants exempts de blanc lors de la plantation, puis d'utiliser les moyens chimiques conventionnels de lutte : fongicides protectants tôt au printemps afin de protéger les feuilles et les fleurs contre l'infection et fongicides curatifs au cours de l'été pour diminuer le développement de la maladie (Maas, 1998; Urbain, 2008; Xiao *et al.* 2001). Toutefois, peu de produits sont homologués au Canada pour lutter contre *S. macularis*. Parmi ceux-ci, notons le NOVA 40W™ (myclobutanil), principal fongicide utilisé contre le blanc depuis quelques années, qui agit de façon curative (post-infection) et préventive, le PRISTINE WG™ (boscalide, pyraclostrobine) qui agit aussi de façon préventive (inhibition de la germination de spores) et curative ou par éradication (inhibition de la croissance mycélienne et de la sporulation), puis, le LIME SULFUR SOLUTION™ (chaux soufrée) qui peut être employé en début de saison pour réduire la germination des spores du

champignon (Anonyme, 2008c; Urbain, 2008) et enfin l'ACTINOVATE SP, produit biologique homologué (Anonyme, 2008c; Urbain, 2008). Les fongicides chimiques sont habituellement utilisés en rotation pendant toute la saison de production à des intervalles de 7 à 21 jours entre chaque application. Beaucoup plus nuancé, Urbain (2008) propose d'employer les produits phytosanitaires en fonction du type de cultivar conventionnel ou jour neutre, de l'année de plantation ou de récolte et de la période de la saison.

Les moyens de lutte chimique contre le blanc comportent plusieurs désavantages. Le moment d'application des fongicides de façon préventive ne tient pas suffisamment compte de l'épidémiologie du champignon (Blanco *et al.* 2004 ; Carisse *et al.* 2005). En conséquence, certaines applications ne sont peut-être pas nécessaires au regard du risque de développement de la maladie. Le cycle évolutif de type polycyclique de *S. macularis* fait en sorte que les traitements peuvent sembler moins efficaces s'ils ne sont pas synchronisés avec le développement du blanc (Blanco *et al.* 2004 ; Carisse *et al.* 2005). Ainsi, en considérant que les producteurs font en moyenne une douzaine de traitements fongicides contre le blanc chez le fraisier à jour neutre et que certains pourraient être évités, la production pourrait être plus durable et moins nocive pour l'environnement.

1.3.2 Lutte raisonnée

La connaissance de la résistance ontogénique, d'une part, et de l'épidémiologie et des systèmes prévisionnels, d'autre part, constitue la pierre angulaire de la lutte raisonnée contre le blanc du fraisier.

1.3.2.1 Résistance ontogénique

En général, la sensibilité aux agents pathogènes saprophytes et parasites facultatifs augmente avec l'âge, tandis que la sensibilité aux parasites obligatoires diminue avec l'âge. La prédisposition ontogénique peut être classée en quatre groupes: sensibilité juvénile et résistance mature, résistance juvénile et sensibilité mature, plants juvéniles et matures sensibles et période de résistance entre les deux, plants juvéniles et matures résistants et période de sensibilité entre les deux (Yarwood, 1959).

Afin de préciser les risques de développement du blanc, on doit tenir compte de la sensibilité variétale des fraisiers, des périodes à risque influencées par les conditions environnementales, et de la résistance ontogénique des feuilles de fraisier au blanc. En épidémiologie botanique, l'expression de la résistance de l'hôte peut être évaluée de différentes façons : la réduction du nombre total d'infections, la réduction du taux d'expansion des lésions, la réduction de la sporulation (fructification), la prolongation de la période de latence ou d'incubation, la réduction de la déposition des spores (en fonction de la position, de l'orientation, de la dimension ou des caractéristiques de la surface de la feuille), la réduction de la période infectieuse, et l'accroissement du nombre de propagules nécessaires à l'établissement de l'infection (Berger, 1977).

La résistance ontogénique, phénomène par lequel une plante ou une partie d'une plante est plus résistante ou tolère mieux une maladie avec l'âge ou la maturité (Ficke *et al.* 2002), a été observée entre autres chez le blanc de la vigne (Ficke *et al.* 2002, 2003, 2004; Gadoury *et al.* 1997a et b, 2003; Gadoury et Seem, 1995). Ainsi, *Uncinula (Erisyphe) necator*, agent du blanc de la vigne, se développe presque exclusivement sur les jeunes feuilles de vigne, tandis que les feuilles âgées de plus de deux mois ne sont pratiquement pas infectées (Sall et Teviotdale, 1981, cités dans Doster et Schnathorst, 1985). La résistance ontogénique a aussi

été observée chez d'autres hôtes et d'autres blancs (Li et Xu, 2002; Mence et Hildebrandt, 1966; Weinhold et English, 1964, cités dans Doster et Schnathorst, 1985).

Chez le fraisier, la dynamique de production du feuillage est très différente dépendamment qu'il s'agit de fraisiers conventionnels ou de fraisiers à jour neutre. C'est pourquoi le phénomène de la résistance ontogénique par rapport aux périodes de croissance des plants pourrait ne pas avoir le même impact chez un cultivar conventionnel et un cultivar à jour neutre. Dans le premier cas (cv. conventionnel), une période de croissance rapide du feuillage précède la période de floraison, puis suite à la rénovation, une seconde période de croissance du feuillage a lieu en fin de saison. Ainsi, la période de croissance des plants est limitée en début de saison, ce qui diminue les risques d'infection durant la période de production. Les épidémies de blanc dans un champ de fraisiers conventionnels sont bien souvent observées après la récolte des fruits ou suite à la rénovation de la fraisière, ce qui diminue l'impact du blanc (Simpson, 1987). Dans le cas des fraisiers à jour neutre, la croissance est continue et la récolte s'étend sur plusieurs semaines, au moment où, bien souvent, toutes les conditions sont réunies pour la propagation rapide du blanc (Carisse, comm. pers.; Simpson, 1987). Un étalement de la production avec l'utilisation de cultivars à jour neutre allonge ainsi la période de sensibilité des fraisiers au blanc.

Dans le cadre de la lutte intégrée contre le blanc du fraisier, la résistance ontogénique permettrait une utilisation raisonnée des fongicides (Amsalem *et al.* 2006), en termes d'opportunité et de nombre d'applications, une meilleure répression de la maladie et une réduction des pertes (Amsalem *et al.* 2006).

1.3.2.2 Systèmes prévisionnels et indicateurs météorologiques

Le développement de nouvelles stratégies d'intervention basées sur des systèmes prévisionnels pourrait aussi contribuer à lutter plus efficacement contre le blanc du fraisier. Les systèmes prévisionnels améliorent la lutte aux maladies durant les périodes de fortes infestations ou contribuent à réduire l'utilisation des fongicides lorsque les risques sont moindres (Carisse *et al.* 2005). Les systèmes prévisionnels constituent aussi des moyens simples et utiles pour prévenir les producteurs de l'imminence de graves épidémies (Gadoury et Seem, 1995). L'intensité d'une épidémie est déterminée principalement par le nombre ou la quantité de spores qui réussiront à infecter les tissus de l'hôte, le taux d'expansion et de croissance des colonies, et la période de latence, correspondant à l'intervalle entre l'infection initiale et la sporulation (Xu, 1999).

Ainsi, plusieurs systèmes prévisionnels ont été développés pour le blanc de la pomme (*Podosphaera leucotricha*). Les variables incluses dans ces systèmes prévisionnels sont diverses, que ce soit l'incidence et l'intensité de la maladie, la progression de la maladie versus le nombre ou la concentration de spores captées dans l'air, les effets des conditions météorologiques sur la quantité de spores dans l'air, la sporulation et la durée de la période d'incubation (ou de latence), l'effet de l'âge (ontogénie) de la feuille, et la lutte chimique (Xu, 1999).

Chez le fraisier, un modèle d'estimation des risques du blanc a été développé en Californie par Hoffman et Gubler (2002). Ce modèle se base exclusivement sur la température. Or, le développement de *S. macularis* est influencé entre autres par la température, mais aussi par l'humidité relative, les précipitations et la photopériode (Blanco *et al.* 2004; Miller *et al.* 2003). Selon Blanco *et al.* (2004), le lien entre la concentration de conidies dans l'air, l'humidité relative et la pluie est manifeste. Ainsi, une description plus détaillée des effets des facteurs

environnementaux sur le développement du blanc du fraisier au Québec est nécessaire afin de comprendre et de prédire la progression des épidémies.

1.4 Problématique

La recrudescence du blanc du fraisier au Québec pourrait être due à l'utilisation de nouveaux cultivars à jour neutre plus sensibles au blanc, ou à une intensification de la production. Pour le moment, la lutte conventionnelle au blanc du fraisier se fait de façon préventive avec des applications régulières de fongicides (Miller *et al.* 2003; Urbain, 2008). La lutte chimique est nécessaire pour prévenir les pertes de qualité et de rendement en fruits (Miller *et al.* 2003). De plus, la lutte chimique entraîne des coûts pour le producteur. En Floride, un calendrier basé sur un programme de fongicides avec des applications hebdomadaires est pratique courante dans la production de fraises commerciales, et un tel programme coûte près de 1 400 dollars par ha (Xiao *et al.* 2001). Or, jusqu'à maintenant, aucune étude portant sur l'épidémiologie de cette maladie n'a encore été faite sous les conditions de culture du Québec. Ce manque de connaissances nuit à la mise en oeuvre efficace des moyens de lutte contre le blanc du fraisier.

La relation entre la résistance ontogénique variétale, les conditions environnementales, les systèmes prévisionnels, la concentration de spores de *S. macularis* f. sp. *fragariae* dans l'air et l'intensité du blanc doit être examinée dans le contexte de la production de fraisiers conventionnels ou à jour neutre au champ au Québec.

Chapitre 2

Sensibilité variétale au blanc et résistance ontogénique des feuilles de fraisier

Résumé

Le blanc du fraisier, causé par *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragaria*, est en recrudescence dans les champs de fraises du Québec. Puisque l'épidémiologie de ce champignon est peu documentée, la stratégie d'intervention tend à être préventive. Dans l'optique d'optimiser la lutte, il est important de connaître la sensibilité variétale et d'identifier les périodes à risque, influencées par les conditions environnementales et la sensibilité (ontogénique) des feuilles à la maladie. Au cours des saisons 2006 et 2007, le développement du blanc a été suivi une fois par semaine à compter de l'apparition des premiers signes chez les cultivars 'Annapolis', 'Aromas', 'Cavendish', 'Chambly', 'Darselect' et 'Kent'. Les résultats de 2006 et 2007 montrent deux groupes de cultivars pour ce qui est de leur sensibilité au blanc : 'Chambly' et 'Darselect' partageant généralement l'intensité la plus élevée et 'Annapolis' et 'Aromas' partageant l'intensité la plus faible. Pour ce qui est de l'incidence des cléistothèces sur les feuilles, les résultats ont démontré que les cultivars 'Cavendish', 'Chambly' et 'Darselect' présentaient la fréquence de cléistothèces la plus élevée. En 2007, l'influence de l'âge des feuilles (résistance ontogénique) sur leur sensibilité au blanc a été étudiée en champ chez les cultivars 'Jewel' (conventionnelle) et 'Seascape' (jour neutre). Cinq plants, dont le stade de développement (âge) des sept plus jeunes feuilles a été identifié, ont été inoculés à huit reprises, puis évalués en fonction de l'intensité du blanc. Des différences significatives ont été observées quant au développement de la maladie. Chez les deux cultivars, 'Jewel' et 'Seascape', la sensibilité du feuillage au blanc était significativement plus élevée sur les jeunes feuilles et la sensibilité a diminué avec la maturité de la feuille. Le patron de sensibilité a été décrit par un modèle de la forme exponentielle inversée qui explique 97,9 % de la variation de sensibilité des feuilles en fonction de leur maturité.

2.1 Introduction

Le blanc du fraisier, *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragaria*, est en recrudescence dans les fraisières au Québec depuis la fin des années 1990 (Lacroix, 2005). Au cours des années 1960, plusieurs études ont été réalisées sur le blanc du fraisier. En revanche, très peu de projets de recherche ont été menés durant les trente ans qui suivirent. L'utilisation de cultivars sensibles au blanc, comme le cv. à jour neutre 'Seascape' (enregistré en 1991), peut expliquer l'aggravation de cette maladie au Québec (Caron, 1999; Coulombe, 1976; Hsu *et al.* 1969; Lacroix, 2005).

Il n'existe pas de cultivar ayant une résistance complète au blanc du fraisier. Les expressions telles que « plus résistant » ou « moins sensible » (Populer, 1978) sont souvent utilisées pour décrire la sensibilité variétale des fraisiers au blanc. Il existe une grande variation de sensibilité au blanc parmi les cultivars de fraisier (Berkeley, 1854, cité par Nelson *et al.* 1996; Daubeny, 1959; Jhooty et McKeen, 1965; Mence et Hildebrandt, 1966, cités par Doster et Schnathorst, 1985; Miller et Waldo, 1957; Nelson *et al.* 1996; Orchard et Van Adrichem, 1957; Peries, 1962b; Simpson, 1987). Puisque de graves épidémies de blanc peuvent entraîner des pertes pouvant aller jusqu'à 50 %, le choix des cultivars demeure une étape cruciale dans la production de fraises (Nelson *et al.* 1995). Cette sensibilité variétale peut être estimée de différentes façons, soit en notant l'intensité de la maladie observée sur les feuilles et en comparant les différents cultivars entre eux, ou en notant l'incidence (présence ou absence) des ascocarpes (cléistothèces), formes de conservation.

Malgré l'avancement de la recherche faite chez le pommier (Li et Xu, 2002), le fraisier (Nita *et al.* 2003) et la vigne (Gee *et al.* 2008) concernant la résistance ontogénique, ce phénomène reste encore bien incompris (Develey-Rivière et

Galiana, 2007). Les périodes de risque d'épidémie du blanc sont influencées par la sensibilité des cultivars et la résistance ontogénique des feuilles de fraisier. Afin de vérifier cette hypothèse, l'objectif suivant a été défini : Déterminer la sensibilité variétale et la résistance ontogénique au blanc des feuilles de fraisiers conventionnels et à jour neutre.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Parcelles expérimentales

2.2.1.1 Sensibilité des cultivars

L'étude a été réalisée en champ à deux stations, sur les fermes expérimentales d'Agriculture et Agroalimentaire Canada de l'Acadie et de Frelighsburg durant les saisons de culture 2006 et 2007, respectivement. Six cultivars ont été utilisés, soit cinq conventionnels, les cv. 'Annapolis', 'Cavendish', 'Chambly', 'Darselect' et 'Kent', et un à jour neutre, le cv. 'Aromas'. Les pseudo répétitions correspondaient aux années.

Les parcelles de 2006 situées à l'Acadie et constituées des six cultivars, avaient deux doubles rangs sur plastique noir avec un écartement de 1,40 mètres entre les rangs. Les parcelles faisaient quatre mètres de large par 18 mètres de long. Quarante plants par cultivar étaient plantés en quinconce avec un espacement de 30 centimètres entre les plants. Les six parcelles (cultivars) de 2007, situées à Frelighsburg, avaient six doubles rangs sur plastique noir avec un écartement de 1,40 mètres entre les rangs. Les parcelles faisaient 7,4 mètres de large sur 5 mètres de long (annexe A.2). Deux cent seize plants par cultivar étaient placés en quinconce avec un espacement de 30 centimètres entre les plants.

2.2.1.2 Résistance ontogénique des feuilles

L'étude a été réalisée en champ sur la ferme expérimentale d'Agriculture et Agroalimentaire Canada située à Frelighsburg durant la saison de culture 2007. Deux cultivars, 'Jewel' (fraisier conventionnel) et 'Seascape' (fraisier à jour neutre), ont été utilisés. Les deux parcelles (cultivars) étaient constituées de 5 rangs nattés en conventionnel et 5 buttes sur paillis de plastique noir en jour neutre, sur 12 mètres de long et 6 mètres de large, avec un écartement de 1,40 mètres entre les rangs et un espacement de 30 centimètres entre les plants. En début de saison, 50 plants de chaque cultivar ont été sélectionnés aléatoirement. Les deux parcelles ont été traitées de façon à réprimer rigoureusement le blanc avec au moins une application de fongicides une fois par semaine : NOVA 40W™ (myclobutanil) à 0,34 kg/ha, CABRIO EG™ (pyraclostrobine) à 0,75 kg/ha et LIME SULFUR SOLUTION™ (chaux soufrée) à 6 kg/ha, en alternance. Deux semaines avant une inoculation, cinq plants par cultivar étaient sélectionnés aléatoirement et étaient protégés des fongicides à l'aide de sacs de plastique (Gadoury *et al.* 2003). Ces derniers étaient retirés, une à deux heures après le traitement fongicide.

Huit inoculations du blanc ont été effectuées à compter de la fin juin chez le cultivar conventionnel 'Jewel' (28 juin, 5 juillet, 12 juillet, 19 juillet, 26 juillet, 2 août, 16 août, 30 août 2007) et à compter de la fin juillet chez le cultivar à jour neutre 'Seascape' (26 juillet, 2 août, 16 août, 30 août et 6 septembre, 13 septembre, 20 septembre, 27 septembre 2007).

Procédure d'inoculation

L'inoculum provenait de feuilles de plants de fraisiers cultivés en serre infectées par *Sphaerotheca* f. sp. *macularis* et présentant des colonies sporulantes. Les plants étaient maintenus à 25°C (+/-3°C), avec 80-95% d'humidité (humidité fournie par un brumisateur). Des lames de microscope enduites d'une fine couche de silicone étaient placées au sol au champ entre les plants, afin d'évaluer la densité de spores tombées. Le comptage se faisait sur 30 % de la surface de la lame. Les résultats de ces comptages ne sont pas présentés. Pour l'inoculation proprement dite, un cylindre de plastique d'environ 1 mètre de haut et 50 centimètres de diamètre, ouvert aux deux extrémités, faisait office de tour à inoculation et était placé autour des plants à inoculer. Une pipette Pasteur reliée à une pompe (Airbrush, ajustée à 100 kPa) soufflait les conidies des feuilles sporulantes du haut de la tour sur les feuilles saines sur les faces supérieures et inférieures (Miller *et al.* 2003).

2.2.2 Collecte des données

2.2.2.1 Sensibilité des cultivars

Pour l'étude de la sensibilité des cultivars au blanc, l'intensité de la maladie a été notée dès l'apparition des premiers symptômes sur les feuilles. L'intensité du blanc était notée à l'aide de cotes de 0 à 5 correspondant au recouvrement (%) de la feuille par le blanc (tableau 2.1) et pour lequel, 0 = pas de blanc visible, 1 = moins de 10% de recouvrement par le blanc, 2 = 10% à 25%, 3 = 26% à 50%, 4 = 51% à 75%, 5 = plus de 75% (Viret *et al.* 1998). L'évaluation consistait à observer les deux faces des trois folioles de toutes les feuilles de cinq plants par cultivar choisis aléatoirement à chaque échantillonnage. L'intensité du recouvrement par le blanc était notée une fois par semaine du 7 juillet au 9 octobre 2006 et du 13 juin au 2 octobre 2007. Durant la dernière journée d'échantillonnage annuel, la présence ou l'absence (incidence) des cléistothèces

était notée sur les mêmes plants. L'incidence était évaluée sur la face inférieure des dix plus jeunes feuilles de chaque plant. Aucune répétition de prise des données dans le temps n'a été effectuée pour cette partie (cléistothèces) de l'étude.

Tableau 2.1 Lien entre les cotes d'intensité de Viret *et al.* (1998) et le recouvrement du blanc sur les feuilles.

Cotes d'intensité	Recouvrement (%)	Recouvrement moyen (%)
0	0	0
1	1-10	5
2	10-25	18
3	25-50	38
4	50-75	63
5	+ 75	88

2.2.2.2 Résistance ontogénique des feuilles

L'intensité du blanc sur les feuilles a été évaluée cinq, sept et neuf jours après l'inoculation des plants, selon sept stades phénologiques (âge) différents (annexe A.3). La surface présentant des lésions sporulantes a été évaluée à l'aide d'une échelle de notation de 0 à 8 pour laquelle, 0= aucun symptôme, 1= 1 à 10% de la surface foliaire infectée, 2= 11 à 20%, (...), 8= 71 à 80% de la surface foliaire infectée. Une fois les données recueillies, les feuilles et les fruits infectés étaient immédiatement arrachés après la collecte des données pour éviter de contaminer les autres plants.

2.2.3 Analyses statistiques

2.2.3.1 Sensibilité des cultivars

Les analyses effectuées pour cette partie de l'expérimentation visaient à déterminer la sensibilité relative des cultivars au *S. macularis*. Les données

recueillies sur les trois folioles et les deux surfaces des feuilles ont été regroupées. Pour l'année 2006 (L'Acadie), les cinq premières feuilles de chaque plant ont été soustraites des analyses statistiques, car elles n'ont jamais présenté d'infection par *S. macularis*. Le cultivar 'Cavendish' a été retiré des analyses statistiques de 2006 (L'Acadie), puisque son évaluation n'a été faite que sur un échantillon de deux plants comparativement à cinq pour les autres cultivars. Ceci permettait de donner le même poids à l'ensemble des données, et assurer ainsi une analyse plus homogène de la sensibilité des cultivars au développement de *S. macularis*. L'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC) (Amsalem *et al.* 2006) a été calculée pour chaque cultivar à partir des valeurs d'intensité du blanc au cours des saisons 2006 et 2007.

$$AUDPC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} [(Y_{i+1} + Y_i) / 2] [t_{i+1} - t_i]$$

Où n = nombre total d'observations, Y = l'intensité (%) à la $i^{\text{ème}}$ observation, et t = temps (jours) depuis la dernière notation à la $i^{\text{ème}}$ observation (Shaner et Finney, 1977 ; Celio et Hausbeck, 1997 ; Carisse *et al.* 2005 ; Gugino *et al.* 2007). L'AUDPC a été soumise à une analyse de variance à chaque année afin d'évaluer la différence de sensibilité au blanc entre les cultivars (Amsalem *et al.* 2006).

Enfin, l'incidence des cléistothèces sur les feuilles a été analysée en combinant les données de 2006 (L'Acadie) et 2007 (Frelighsburg) obtenues chez les six cultivars. L'incidence étant une donnée binomiale, une régression logistique a été utilisée pour comparer les cultivars en fonction de l'incidence des cléistothèces sur les feuilles.

2.2.3.2 Résistance ontogénique des feuilles

Les analyses pour ce volet de l'étude consistaient à déterminer l'influence de l'âge des feuilles sur le développement de *S. macularis*, ainsi que de développer un modèle permettant de décrire cette relation. Premièrement, une analyse de variance a été effectuée sur l'intensité moyenne du blanc.

Puis, un modèle expliquant la relation entre l'âge des feuilles et la Pmax (proportion du recouvrement maximum) a été développé à partir de cinq essais d'inoculation choisis aléatoirement parmi les huit essais d'inoculation réalisés. Les trois autres essais, représentant des données indépendantes, ont servi à la validation du modèle. La Pmax est définie comme suit : intensité (%) par feuille /intensité (%) maximum observée sur le même plant. Le modèle de régression, non linéaire, a été développé à partir des données (Pmax) combinées des cultivars 'Jewel' et 'Seascape'.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels SAS (Institut SAS Inc., Cary, NC, Version 9.1) et ExcelStat (XLSTAT Version 2008.3.01).

2.3 Résultats

2.3.1 Sensibilité des cultivars

L'analyse de variance faite sur l'aire sous la courbe (AUDPC), à un seuil $\alpha=0,05$, a permis de définir deux groupes distincts en 2006 : 'Chambly' et 'Darselect' comme étant les plus sensibles; 'Annapolis', 'Aromas' et 'Kent' comme étant moyennement ou moins sensibles que le premier groupe (figure 2.1 A). Toutefois,

les résultats ont été différents en 2007. Le cultivar 'Annapolis' était significativement moins sensible que 'Chambly', 'Kent', 'Cavendish' et 'Darselect', tandis que le cultivar 'Aromas' présentait une sensibilité intermédiaire, non significativement différente de celle des cultivars les plus sensibles et les moins sensibles (figure 2.1 B).

Les moyennes des intensités de blanc de chacun des cultivars et les moyennes des intensités de blanc de cinq plants pour l'ensemble des cultivars en fonction des jours juliens pour 2006 (L'Acadie) et 2007 (Frelighsburg) sont présentées à l'annexe A4.

Pour ce qui est de l'incidence des feuilles avec cléistothèces pour les observations des années combinées 2006 à l'Acadie (jour julien 289) et 2007 à Frelighsburg (jour julien 275), le cultivar 'Chambly' présentait la fréquence la plus élevée (53 %), tandis que la fréquence la moins élevée (13 %) était observée chez le cultivar 'Aromas' (figure 2.2). L'analyse de régression logistique à un seuil $\alpha=0,05$ a établi que les cultivars 'Chambly', 'Cavendish', et 'Darselect' formaient un groupe distinct, cultivars non différents significativement l'un de l'autre, et présentant une fréquence plus élevée de cléistothèces de 46 % à 53 % (figure 2.2). Les cultivars 'Kent', et 'Annapolis' et 'Aromas' formaient un deuxième groupe qui porte significativement moins de cléistothèces que le premier groupe, avec des fréquences variant de 13 % à 28 % (figure 2.2). Le cultivar 'Kent' (fréquence de 28 %) portait significativement plus de cléistothèces qu'Aromas (13 %) (figure 2.2). Les paramètres résultant de la régression logistique de l'incidence des cléistothèces sont présentés au tableau 2.2.

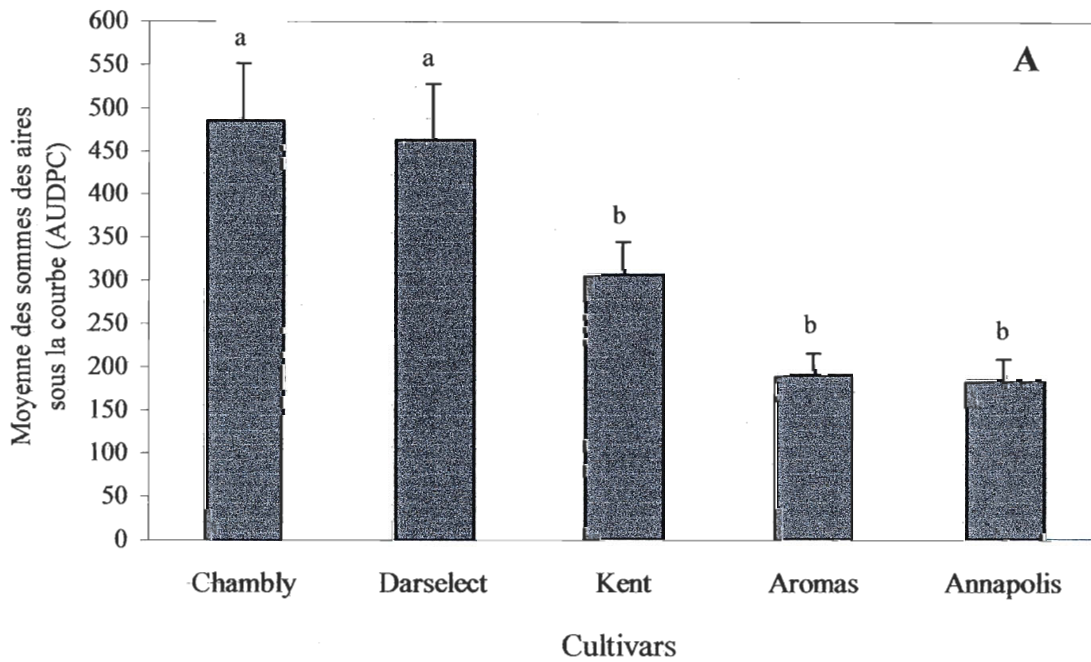
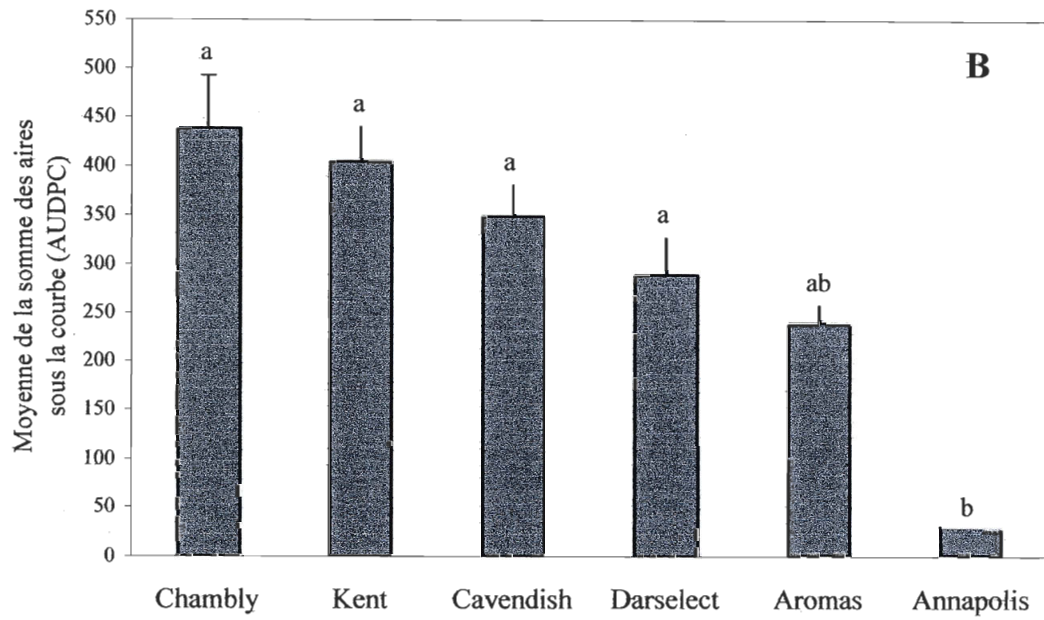


Figure 2.1 Moyennes des sommes des aires sous la courbe de progression (AUDPC) du blanc du fraisier chez six cultivars pour les saisons 2006 (A) et 2007 (B). Le cultivar ‘Cavendish’ a été exclu des analyses de 2007. Une lettre commune désigne un groupe de cultivars pour lesquels il n’y a pas de différences significatives au seuil $\alpha=0,05$ (test de Tukey).

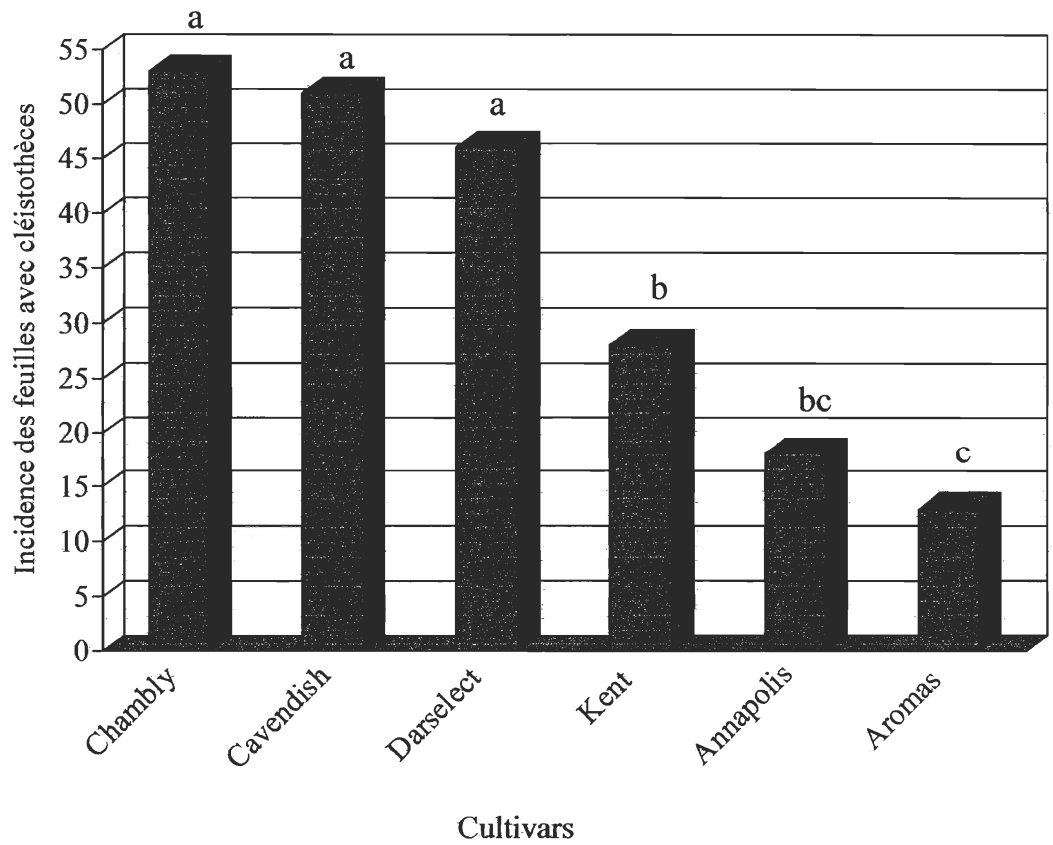


Figure 2.2 Incidence des cléistothèces du *F. macularis* f. sp. *fragariae* sur les feuilles de six cultivars de fraisières pour les années combinées 2006 (L'Acadie) (jour julien 289) et 2007 (Frelighsburg) (jour julien 275). Une lettre commune indique qu'il n'y a pas de différences significatives entre les cultivars pour un seuil $\alpha=0,05$ (test de Khi^2).

Tableau 2.2. Paramètres résultant de la régression logistique de l'incidence des cléistothèces chez différents cultivars de fraisier pour les années 2006 et 2007 combinées.

Source	Valeur	Écart-type	Khi ² de Wald	Pr > Khi ²	Wald Borne inf. (95%)	Wald Borne sup. (95%)
Constante	-1,516	0,260	33,938	< 0,0001	-2,027	-1,006
Cv- Annapolis	0,000	0,000				
Cv- Aromas	-0,385	0,395	0,947	0,330	-1,159	0,390
Cv- Cavendish	1,574	0,353	19,817	< 0,0001	0,881	2,266
Cv- Chambly	1,636	0,328	24,821	< 0,0001	0,993	2,280
Cv- Darselect	1,356	0,329	17,024	< 0,0001	0,712	2,000
Cv-Kent	0,572	0,343	2,787	0,095	-0,100	1,243

2.3.2 Résistance ontogénique des feuilles

En ce qui a trait à la résistance ontogénique des feuilles au blanc, les deux cultivars examinés en 2007 ('Jewel' conventionnel et 'Seascape' à jour neutre) présentaient une moyenne (%) d'intensité de blanc décroissante en fonction du stade de maturité (âge) des feuilles (figure 2.3). De plus, cette moyenne a diminué significativement du premier au cinquième stade pour ensuite se stabiliser à près de 0 % aux stades 6 et 7. Les résultats de la moyenne de la proportion du maximum (Pmax), calculée sur l'intensité (%) de blanc, montrent les mêmes effets significatifs (tableaux 2.3 et 2.4). En 2007, la Pmax de l'intensité du blanc a diminué significativement du premier au sixième stade chez les deux cultivars (tableaux 2.3 et 2.4). Le premier stade était le plus sensible au développement du blanc avec une moyenne de Pmax de 1,0, tandis que les stades 6 et 7 présentaient les moyennes de Pmax les plus faibles (0,025 et 0,005 pour 'Jewel' ; 0,023 et 0,005 pour 'Seascape') (tableaux 2.3 et 2.4).

Le modèle de régression de la relation entre les stades de maturité (âge) des feuilles et l'intensité de la maladie est non linéaire et a la forme : $y = a \cdot e^{-bx}$. L'équation correspond à : $P_{max} = 1,8330 \cdot e^{-0,5652x}$. Le modèle explique 97,91 % ($R^2_{ajusté}=0,9791$) des observations de 2007 de la proportion du maximum (Pmax) des cultivars combinés 'Jewel' et 'Seascape' (figure 2.4). La régression linéaire entre les valeurs moyennes observées du Pmax et les valeurs prédites par le modèle est présentée à l'annexe A.5.

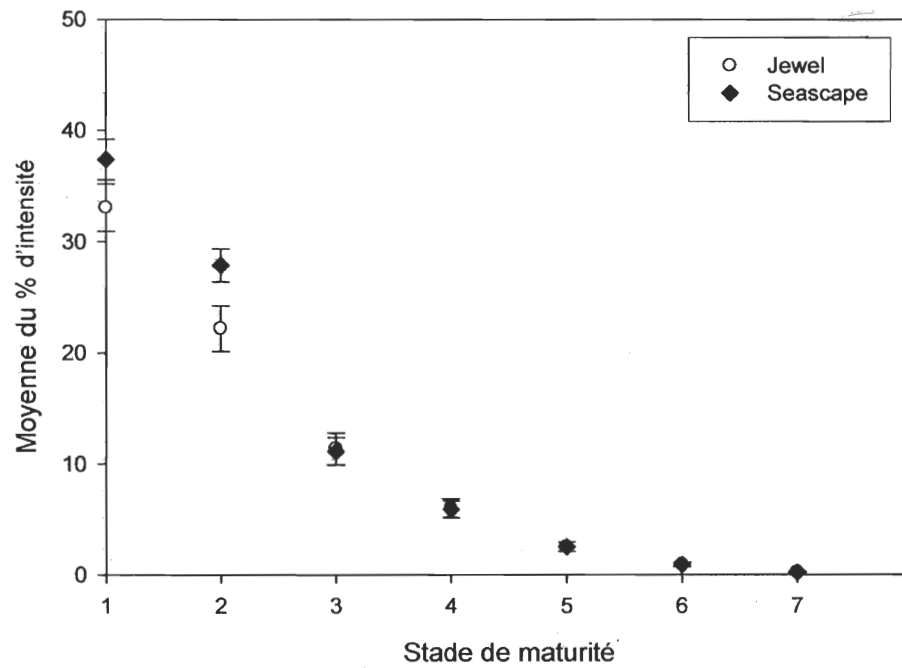


Figure 2.3 Moyennes (%) d'intensité du blanc en fonction de l'âge de la feuille chez les cultivars de fraiser 'Jewel' et 'Seascape' en 2007 (Frelighsburg). Les lignes verticales correspondent aux écarts-type des valeurs de Pmax et du % d'intensité.

Tableau 2.3 Comparaison des sept stades de maturité (âge) des feuilles pour la Pmax du blanc du cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en 2007.

Stades	Effectif	Pmax
1	40	1,00000 a ^a
2	40	0,65605 b
4	40	0,33852 c
3	40	0,17671 d
5	40	0,07351 e
6	40	0,02576 f
7	40	0,00544 f

^a Une lettre commune indique qu'il n'y a pas de différences significatives entre deux stades pour un seuil $\alpha=0,05$ (test de F).

Tableau 2.4 Comparaison des sept stades de maturité (âge) des feuilles pour la Pmax du blanc du cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en 2007.

Stades	Effectif	Pmax
1	40	1,00000 a ^a
2	40	0,74272 b
4	40	0,29250 c
3	40	0,15271 d
5	40	0,06461 e
6	40	0,02271 f
7	40	0,00500 f

^a Une lettre commune indique qu'il n'y a pas de différences significatives entre deux stades pour un seuil $\alpha=0,05$ (test de F).

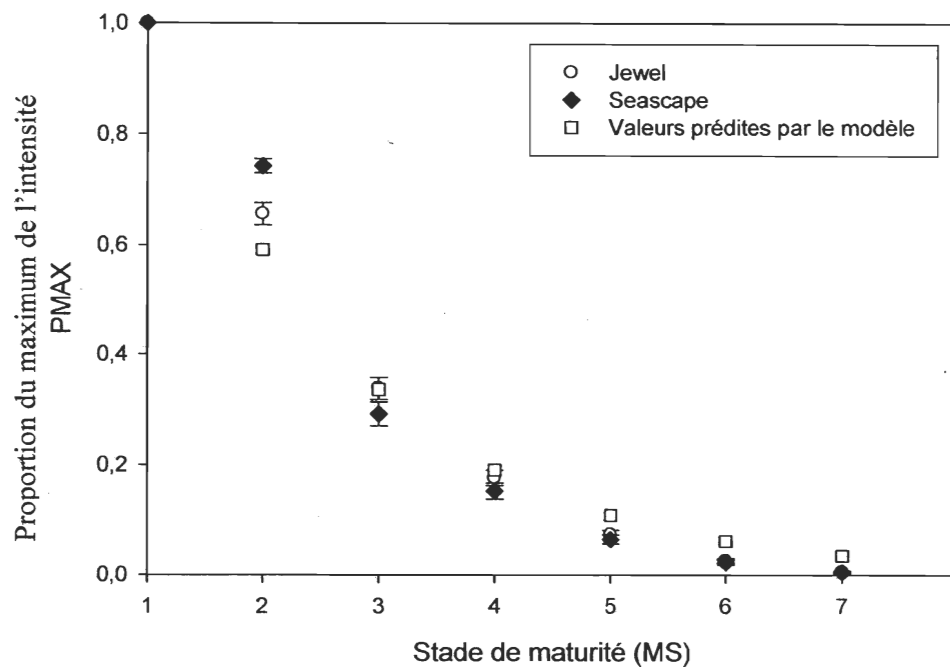


Figure 2.4 Valeurs moyennes observées de la proportion du maximum (Pmax) de l'intensité du blanc et valeurs prédites par le modèle en fonction du stade de maturité (âge) des feuilles pour les cultivars de fraisier 'Jewel' (conventionnel) et 'Seascape' (à jour neutre) en 2007 (Frelighsburg). Les lignes verticales correspondent aux écarts-type des valeurs de Pmax.

2.4 Discussion

L'objectif de cette étude était double : d'une part comparer des cultivars de fraisiers conventionnels et à jour neutre pour leur sensibilité au blanc en fonction de l'intensité de la maladie et de l'incidence des cléistothèces sur les feuilles et d'autre part, déterminer la sensibilité des feuilles de fraisiers conventionnel et à jour neutre en fonction de leur âge (résistance ontogénique). Ainsi, au regard des résultats, il apparaît qu'il existe une variabilité de la sensibilité variétale au blanc causé par *S. macularis* chez le fraisier. Vu les variations des conditions météorologiques en 2006 et 2007, les valeurs d'AUDPC présentent quelques différences pour ce qui est du degré de sensibilité des cultivars. En revanche, le cv. 'Chambly' est constamment parmi les cultivars les plus sensibles et 'Annapolis' constamment parmi les cultivars les moins sensibles au blanc en 2006 et 2007 (figure 2.1). De plus, le cv. 'Aromas' à jour neutre est généralement parmi les moins sensibles autant en 2006 qu'en 2007.

De nombreux travaux relatifs à la résistance des cultivars de fraisier ont porté sur d'autres cultivars que ceux étudiés ici (Miller et Waldo, 1957; Orchard et van Adrichem, 1957; Daubeny, 1959; Peries, 1962b; Nelson *et al.* 1996). Peu d'information est disponible quant à la sensibilité des principaux cultivars utilisés au Québec (Coulombe, 1976). Cette étude constitue donc une première évaluation de la sensibilité variétale au blanc des principaux cultivars de fraisier présentement cultivés au Québec.

La résistance complète au blanc du fraisier n'a jamais été rapportée (Peries, 1962b), mais, durant les années 60 et 70, plusieurs études ont été faites sur l'hérédité de la résistance des fraisiers au blanc (Daubeny, 1961; Hsu *et al.*, 1969; MacLachlan, 1978; McNicol et Gooding, 1979, cités dans Simpson, 1987). En revanche, les conclusions qui en ont été tirées sont quelque peu différentes

(Nelson *et al.* 1995). Entre autres, la différence de sensibilité entre les cultivars de fraisier pourrait être expliquée par des facteurs génétiques. Les gènes de résistance seraient récessifs chez certains cultivars et dominants chez d'autres (Daubeny, 1959). Par ailleurs, Doster et Schnathorst (1985) ont rapporté que la résistance d'un cultivar était corrélée avec la proportion de conidies de *S. macularis* incapables de pénétrer la surface de la feuille. De ce fait, l'épaisseur de la cuticule et des cellules épidermiques à la surface des feuilles jouerait un rôle de barrière physique (Mence et Hildebrandt, 1966, cités par Doster et Schnathorst, 1985; Peries, 1962b). Jhooty et McKeen (1965) ont aussi appuyé cette hypothèse. D'ailleurs, la cutine se retrouve en grande quantité chez les variétés résistantes (Peries, 1962b). Par contre, le rôle des propriétés chimiques et physiques de la cuticule dans l'expression de la résistance au blanc du fraisier reste à définir (Peries, 1962b, cité dans Doster et Schnathorst, 1985).

L'incidence des cléistothèces sur les feuilles concorde avec l'intensité du blanc sur les feuilles. Les cultivars sensibles, 'Chambly', 'Darselect' et 'Cavendish', présentaient la fréquence la plus élevée de feuilles avec des cléistothèces, soit de 46 % à 53 %. Pareillement, les cultivars moins sensibles au blanc des feuilles, 'Aromas' et 'Annapolis', avaient une incidence plus faible, de 13 % à 18 %. La sensibilité des cultivars au blanc peut être déterminée selon les différents signes et symptômes observés. Chez certains cultivars, la première évidence de blanc sera la présence de taches rougeâtres, tandis que chez d'autres, ce sera la présence de mycélium et conidies du blanc sous les feuilles. Aussi, les cléistothèces pourraient apparaître sur les feuilles des cultivars les plus sensibles. Au Canada, la première observation de cléistothèces sur les feuilles d'un plant de fraisier en serre a été faite en 1959 (Jhooty et McKeen, 1962), tandis que Gourley (1979) a observé les premiers cléistothèces en Nouvelle-Écosse chez des plants du cultivar 'Micmac' en 1978, bien que d'autres cultivars aient été présents. Il apparaît donc que les cléistothèces ne sont pas nécessairement observés chez des cultivars spécifiques, ou sur des plants individuels (Jhooty et McKeen, 1962). De plus, le rôle des

cléistothèces comme inoculum initial au printemps reste controversé puisqu'il a été noté que les ascospores (non viables) retrouvées à l'intérieur de l'asque des cléistothèces seraient dégradées par l'hiver (Peries, 1962a).

Quant à la résistance ontogénique des feuilles de fraisier au blanc, les résultats démontrent clairement que les jeunes feuilles sont plus sensibles que les plus vieilles (figures 2.3 et 2.4; tableaux 2.3 et 2.4). La fenêtre de forte sensibilité du fraisier au blanc a été établie entre l'émergence de la feuille et l'ouverture complète de la feuille, lorsqu'elle est encore vert tendre. Ces résultats concordent entre autres avec les travaux d'Amsalem *et al.* (2006) et Okayama *et al.* (1995; cités par Amsalem *et al.* 2006) qui ont observé que les jeunes tissus du fraisier (jeunes feuilles et plants fille dérivés de stolons) sont beaucoup plus sensibles à l'infection du blanc causé par *S. macularis*. En revanche, Jacob *et al.* (2008) rapportent une intensité plus marquée du blanc chez des feuilles matures de tomate. Si, l'âge des feuilles et le cultivar ont une forte influence sur le développement du blanc du fraisier, la sensibilité au blanc de diverses espèces de plantes hôtes pourrait être due à la disponibilité d'hydrates de carbone, ou à leur excès dans certains tissus, qui favoriserait le développement du blanc (Grainger, 1968 et Schoeman *et al.* 1995, cités par Amsalem *et al.* 2006). Les relations source-puits des fleurs et des fruits affecteraient la sensibilité au blanc (Jarvis *et al.* 2002). Ces dernières questions demeurent ouvertes chez le blanc du fraisier.

L'acquisition de la résistance ontogénique à la tavelure *Venturia inaequalis* a été observée chez les feuilles de pommier qui deviennent plus résistantes en vieillissant (Li et Xu, 2002; Ficke *et al.* 2002). Chez le pommier, Li et Xu (2002) sont d'avis que cette résistance ontogénique, selon laquelle il y a une sensibilité juvénile et une résistance mature, peut se manifester de deux façons. Suite à l'inoculation, il est possible d'observer une diminution du nombre de lésions avec la maturité de la feuille. De plus, la période d'incubation ou de latence est de plus

en plus longue avec le vieillissement de la feuille (Li et Xu, 2002). Lorsque la feuille est pleinement développée, la résistance ontogénique commence à s'exprimer, conduisant à une diminution du développement de la tavelure (Li et Xu, 2002). Conséquemment, des chercheurs affirment que la lutte à la tavelure sans tenir compte de la résistance ontogénique contribuerait à fausser l'estimation du véritable risque de la tavelure (Ficke *et al.* 2002). Par ailleurs, de nombreux efforts ont été consacrés à expliquer ce phénomène de résistance ontogénique chez la vigne et le raisin face au blanc *Uncinula necator* (Gadoury et Seem, 1995; Gadoury *et al.* 1997a et b; Gadoury *et al.* 2003; Ficke *et al.* 2002). La résistance ontogénique semble avoir assurément un impact sur le blanc de la vigne. L'étroite fenêtre de forte sensibilité des fruits (raisins) serait centrée sur la floraison chez la vigne (Gadoury et Seem, 1995; Gadoury *et al.* 1997b). La culture de la vigne requiert une grande quantité de fongicides. Malgré cela, *U. necator* reste l'un des agents pathogènes les plus destructifs de la vigne. Ainsi, l'efficacité mitigée de la lutte au blanc peut être expliquée par l'absence de synchronisme entre les applications de fongicides et la sensibilité des fruits ou des feuilles à la maladie.

Les connaissances acquises par cette recherche sur la sensibilité au blanc des cultivars de fraisiers conventionnels et à jour neutre pourront mener à des recommandations aux producteurs de fraises du Québec pour planifier leur plan de gestion de la maladie. D'après Fry (1982), les cultivars moins sensibles aux maladies peuvent retarder l'apparition des symptômes, réduire la dispersion de l'agent pathogène et freiner l'épidémie. Les résultats de cette recherche devraient mener au choix rationnel de cultivars de fraisiers moins sensibles au blanc.

L'information acquise sur la sensibilité variétale et la résistance ontogénique des fraisiers sera utilisée dans le prochain chapitre afin de mieux définir les fenêtres d'intervention contre *S. macularis* f. sp. *fragariae*.

Chapitre 3

Systèmes prévisionnels du blanc du fraisier

Résumé

Malgré le fait que *S. macularis* f. sp. *fragariae* soit en recrudescence dans les fraisières du Québec depuis plusieurs années, il n'existe aucune étude sur l'épidémiologie de cette maladie réalisée sous nos conditions qui permettrait de développer une approche rationnelle et efficace de lutte contre cette maladie. L'intensité élevée du blanc ainsi que les pertes de qualité des fruits encouragent l'utilisation régulière de fongicides. Par conséquent, une meilleure connaissance du champignon pathogène et le développement d'un modèle d'intervention phytosanitaire basé sur son épidémiologie et sur les conditions climatiques du Québec pourraient contribuer à réduire l'utilisation des fongicides et à diminuer les impacts économiques et environnementaux du blanc. Au cours des saisons 2006 et 2007, cinq régies de traitements fongicides basées sur des systèmes prévisionnels développés chez le fraisier ou d'autres cultures ont été comparées en fraisières chez les cultivars conventionnel 'Jewel' et à jour neutre 'Seascape'. Aucune régie de traitements ne s'est démarquée de façon significative pour ce qui est de l'intensité du blanc durant les deux saisons. En revanche, la régie ayant nécessité le moins d'applications de fongicides, autre que le traitement témoin, au cours des deux années est basée sur le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs de conidies. L'estimation de la quantité de conidies dans l'air jumelée au modèle Gubler-Hoffman contribue à préciser le moment d'application des traitements fongicides et à ainsi réduire le nombre de traitements fongicides dans la lutte au blanc du fraisier.

3.1 Introduction

Le blanc du fraisier *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragaria* (Wall. : Fries) Jacz. f. sp. *fragariae* Peries est l'une des principales maladies du fraisier au Québec (Couture *et al.* 2003; Lacroix, 2005). Malgré cela, il n'existe aucune étude sur l'épidémiologie de la maladie réalisée sous nos conditions qui permettrait de développer une approche rationnelle et efficace pour lutter contre cette maladie. De plus, il y a un manque de connaissances et d'outils pour guider les producteurs dans le choix de stratégies d'intervention et de lutte raisonnée contre le blanc. Actuellement, la lutte contre le blanc se veut préventive (Miller *et al.* 2003; Urbain, 2008). La crainte d'une épidémie encourage donc l'utilisation excessive de fongicides. L'intensification des traitements fongicides et le nombre limité de produits fongicides homologués contre le blanc au Québec accroissent le risque de développement d'une résistance du champignon aux matières actives (Nelson *et al.* 1995). La résistance aux fongicides pourrait compromettre l'efficacité à long terme de la lutte chimique. De plus, chaque application constitue un coût considérable pour les producteurs et l'environnement (Xiao *et al.* 2001). Par ailleurs, un manque de synchronisme entre les applications de fongicides et le développement de la maladie pourrait rendre la lutte chimique peu efficace (Carisse et Bacon, 2004). Il est donc pertinent de développer des moyens plus efficaces de planification des applications des fongicides ou de proposer des nouvelles stratégies d'intervention basées sur des modèles de prévision des épidémies (Gadoury *et al.* 1997b).

La lutte chimique conventionnelle peut être modifiée et ainsi devenir une lutte raisonnée (Amsalem *et al.* 2006; Xiao *et al.* 2001). Cette lutte consiste à n'employer les moyens (essentiellement chimiques) de destruction des ravageurs qu'à bon escient, en cas de risque de dépassement d'un certain seuil de nuisibilité (Blanco *et al.* 2004; Carisse *et al.* 2005). De plus, il serait peut-être possible d'utiliser dans certains cas des produits biologiques de remplacement, moins

nocifs pour l'environnement qui pourraient être d'une efficacité comparable aux fongicides de synthèse s'ils sont appliqués en fonction des risques d'épidémies. Les systèmes prévisionnels sont destinés à améliorer la lutte durant les périodes de fortes infestations et à réduire l'utilisation des fongicides lorsque les risques sont moindres (Carisse *et al.* 2005).

Les systèmes prévisionnels basés sur l'épidémiologie sont indispensables pour comprendre le développement d'une maladie sous une variété de conditions. Leurs applications sont nombreuses et incluent entre autres l'impact de la croissance et du développement de l'hôte et des facteurs environnementaux sur le développement de la maladie (Chellemi et Marois, 1991). De nombreux systèmes prévisionnels ont été développés, que ce soit pour *Botrytis squamosa* (brûlure des feuilles) chez l'oignon ou *Botrytis cinerea* (pourriture grise) et *Uncinula necator* (blanc) chez la vigne (Broome *et al.* 1995; Carisse *et al.* 2005; Carisse et Bacon, 2004; Sall, 1980). Dans chacun de ces systèmes prévisionnels, la constante est l'utilisation de variables météorologiques, la sensibilité des cultivars et le stade phénologique de la plante hôte. Chez la carotte, la brûlure cercosporéenne causée par *Cercospora carotae* est l'une des maladies foliaires les plus répandues (Carisse et Kushalappa, 1990). C'est pourquoi il est primordial de connaître et comprendre les conditions favorisant le développement du champignon dans le but de mieux gérer les moyens de lutte. Dans ce cas, la température et la durée d'humectation des feuilles sont les principales variables reliées au développement de la brûlure cercosporéenne, donc au risque d'infection (Carisse et Kushalappa, 1990).

Par ailleurs, le modèle développé au Québec pour le blanc de la vigne, *U. necator*, est basé sur l'accumulation de degrés jours en base 6°C qui représente la température minimale pour la germination des conidies (Carisse et Bacon, 2004). Ainsi, le nombre de degrés jours accumulés correspond à un indice de risque et permet de cibler les moments critiques du développement du blanc. Toujours chez

la vigne, Gubler *et al.* (1999) ont mis au point des indices de risque du blanc basés sur la température de l'air et la durée de l'humectation des feuilles. À partir de ce modèle, Hoffman et Gubler (2002) ont développé un modèle d'estimation des risques d'infection par le blanc du fraisier en Californie. Selon ce modèle (Gubler-Hoffman) une épidémie peut commencer si l'on enregistre pendant quatre heures ou plus d'affilée une température entre 18 et 27°C sous le couvert végétal. La sporulation et la germination de conidies sont alors rapides, pour une période de latence de cinq jours seulement. La fréquence des interventions phytosanitaires est fonction du risque. Si l'indice de risque demeure bas (indice de risque <30 sur une échelle de 0 à 100), l'intervalle entre les traitements s'allonge et s'il est élevé (indice >60), des intervalles plus courts entre les applications sont recommandés (Hoffman et Gubler, 2002). D'autres études démontrent en revanche que la fluctuation de l'incidence du blanc chez le fraisier serait influencée par de nombreux facteurs autres que la température (Blanco *et al.* 2004; Miller *et al.* 2003; Xiao *et al.* 2001).

L'objectif de cette étude est d'améliorer la lutte au blanc du fraisier en comparant des systèmes prévisionnels du blanc développés chez le fraisier ou d'autres cultures et basés sur des indices de risque.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Parcelles expérimentales

L'étude a été réalisée en champ sur les fermes expérimentales d'Agriculture et Agroalimentaire Canada situées à l'Acadie et à Frelighsburg durant les saisons de culture 2006 et 2007, respectivement. Deux cultivars, 'Jewel' (fraisier conventionnel) et 'Seascape' (fraisier à jour neutre), ont été utilisés. Les plants du cultivar conventionnel ont été plantés en 2006 et les traitements fongicides en

fonction des systèmes prévisionnels ont été effectués en 2007. Les plants du cultivar à jour neutre ont été plantés en mai 2006 et 2007 et les essais de systèmes prévisionnels ont été réalisés sur les deux années. Une unité expérimentale était constituée de trois rangs nattés de 4 mètres de large sur 4 mètres de long en conventionnel et trois buttes sur paillis de plastique noir de même dimension en jour neutre. Les unités expérimentales étaient séparées de 4 mètres. Le dispositif expérimental consistait en cinq traitements et trois répétitions en blocs complets aléatoires (annexe A.6).

3.2.2 Traitements et critères de décision

Cinq programmes d'application de fongicides selon différents critères de décision ont été comparés soit : 1) Parcelle témoin sans fongicide; 2) Régie recommandée par le Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2008; régie du producteur); 3) Régie selon le modèle de Gubler-Hoffman; 4) Régie selon le modèle de Gubler-Hoffman et la quantité de conidies de blanc dans l'air (avec capteurs); 5) Régie selon le modèle de degrés jours contre le blanc de la vigne (modèle Carisse) (tableaux 3.1 à 3.3). Les produits fongicides utilisés étaient le NOVA 40W™ (myclobutanil) à 0,34 kg/ha ou le PRISTINE WG™ (boscalide, pyraclostrobine) à 1,5 kg/ha, aux 7 à 14 jours. Pour chacun des traitements, incluant le témoin, des applications de CAPTAN 50W™ (captane) à 4,5 kg/ha ont été faites chez les cv. 'Jewel' et 'Seascape' en 2007, afin de réprimer la pourriture grise *Botrytis cinerea*.

3.2.2.1 Modèle de Gubler-Hoffman

Selon le modèle de Gubler-Hoffman, une épidémie de blanc peut commencer s'il y a trois jours consécutifs où l'on enregistre quatre heures d'affilée ou plus de températures entre 18°C et 27°C sous le couvert végétal. Afin de déterminer le

moment des applications de fongicides, l'indice de risque a été estimé de la façon suivante :

Démarrage de l'indice de risque (Hoffman et Gubler, 2002)

1. En commençant avec l'indice 0 lors de la première journée (de minuit à minuit) où quatre heures ou plus d'affilée de températures entre 18 et 27°C étaient enregistrées, 20 points étaient ajoutés pour chaque journée supplémentaire avec quatre heures ou plus d'affilée de températures entre 18 et 27°C.
2. Si, avant d'atteindre l'indice 60, une journée présentait moins de quatre heures d'affilée entre 18 et 27°C, l'indice était remis à 0.
3. Si l'indice atteignait 60, le risque d'épidémie était atteint et le programme de traitements fongicides était initié.

Tableau 3.1. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraiser chez le cultivar à jour neutre 'Seascape' en 2006 (L'Acadie) selon cinq régions.

Régions					
Date	Témoin	CRAAQ	Gubler-Hoffman	Gubler-Hoffman + capteurs de conidies	Modèle Degrés jours Carisse
Fongicides					
2006-07-10	-	Nova	Nova	Nova	-
2006-07-13	-	-	-	-	Nova
2006-07-19	-	Nova	Nova	-	-
2006-07-24	-	-	-	Nova	Nova
2006-08-16	-	Nova	Nova	-	-
2006-08-24	-	Nova	Nova	Nova	Nova
2006-09-15	-	Nova	-	-	Nova
2006-09-18	-	-	Nova	-	-

Tableau 3.2. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraiser chez le cultivar conventionnel ‘Jewel’ en 2007 (Frelighsburg) selon cinq régions.

Régies					
Date	Témoin	CRAAQ	Gubler-Hoffman	Gubler-Hoffman + capteurs de conidies	Modèle Degrés jours Carisse
Fongicides					
2007-06-06 ^a	Captan	Captan	Captan	Captan	Captan
2007-06-06	-	Nova	-	-	-
2007-06-09	-	-	Nova	-	-
2007-06-18 ^a	Captan	Captan	Captan	Captan	Captan
2007-06-26	-	Pristine	Pristine	-	-
2007-06-30	-	-	-	-	Pristine
2007-07-10	-	-	Nova	-	-

^a Application de Captan 50W™ (captane) pour la répression de la pourriture grise.

Tableau 3.3. Traitements fongicides appliqués contre le blanc du fraiser chez le cultivar conventionnel ‘Seascape’ en 2007 (Frelighsburg) selon cinq régions.

Régies					
Date	Témoin	CRAAQ	Gubler-Hoffman	Gubler-Hoffman + capteurs de conidies	Modèle Degrés jours Carisse
Fongicides					
2007-06-13	-	Nova	-	-	-
2007-06-18	-	-	Nova	-	-
2007-06-26	-	Pristine	Pristine	-	-
2007-07-10	-	Nova	Nova	-	-
2007-07-13	-	-	-	Nova	-
2007-07-19 ^a	Captan	Captan	Captan	Captan	Captan
2007-08-01	-	Nova	Nova	-	Nova
2007-08-15	-	Pristine	Pristine	-	Pristine
2007-08-29	-	-	Nova	-	-

^a Application de Captan 50W™ (captane) pour la répression de la pourriture grise.

Calcul de l'indice de risque (Gubler et al. 1999)

Dès le lendemain de l'atteinte des 60 points, les températures sur une base quotidienne durant toute la saison étaient évaluées et l'indice était ajusté en fonction des règles suivantes :

- Si l'indice 100 était atteint, aucun point ne pouvait être ajouté.
- Si l'indice était à 0, aucun point ne pouvait être soustrait.
- Pas plus de 20 points ne pouvaient être ajoutés par jour.
- Pas plus de 10 points ne pouvaient être soustraits par jour.
- S'il survenait une journée de moins de 4 heures d'affilée de températures entre 18 et 27°C, 10 points étaient soustraits.
- S'il survenait une journée de 4 heures ou plus d'affilée de températures entre 18 et 27°C, 20 points étaient ajoutés.
- Si les températures atteignaient 30,5°C durant plus de 15 minutes, 10 points étaient soustraits.
- S'il y avait 4 heures ou plus d'affilée de températures situées entre 18 et 27°C et que les températures atteignaient 30,5°C durant plus de 15 minutes, 10 points étaient ajoutés.

La décision de procéder aux applications de fongicides est prise sur la base de l'indice de risque (pression de maladie) et sur la présence de signes, de symptômes ou d'infections latentes (latence : période entre le dépôt des conidies (inoculation) et la sporulation; Xu, 1999) (tableau 3.4).

Tableau 3.4. Initiation des applications de fongicides en fonction de l'indice de risque (pression de maladie) (Gubler et al. 1999) du blanc du fraisier.

Indice de risque	Signe ou latence de l'agent pathogène	Matières actives et intervalles		
		Soufre ^a	Inhibiteurs de stérols ^b	Strobilurines ^c
0 – 30	Signe de blanc	Intervalle de 14 à 21 jours	Intervalle de 21 jours ou tel que mentionné sur l'étiquette	Intervalle de 21 jours ou tel que mentionné sur l'étiquette
30 – 50	Latence de 15 jours	Intervalle de 10 à 17 jours	Intervalle de 21 jours	Intervalle de 21 jours
60 et plus	Latence de 5 jours	Intervalle de 7 jours	Intervalle de 10 – 14 jours	Intervalle de 14 jours

^a Soufre : Lime Sulfur- chaux soufrée

^b Inhibiteurs de stérols (DMI) : Nova - myclobutanil (groupe 3)

^c Strobilurines : Pristine – boscalide et pyraclostrobine (groupes 7 et 11)

3.2.2.2 Modèle de degrés jours (Carisse)

Le modèle de degrés jours (DJ) contre le blanc de la vigne (modèle Carisse) est basé sur l'accumulation de degrés jours en base 6°C dès la plantation. Le nombre de degrés jours en base 6°C est calculé à partir de la moyenne des températures quotidiennes diurnes (6h00 à 21h00), dont les températures de plus de 30,5°C ont été exclues. Les traitements fongicides débutent lorsque la proportion de l'inoculum saisonnier (P_{maxacc}) a atteint le seuil de 0,01, soit environ 600 DJ.

$$P_{maxacc} = 1,0755 (1 + e^{-0,0042 \cdot DJ})^{1/1-1,0169}$$

Où P_{maxacc} est la proportion de l'inoculum saisonnier, et DJ correspond au nombre de degrés jours cumulatifs en base 6°C.

3.2.3 Collecte des données

La concentration de conidies dans l'air de *S. macularis* a été estimée à l'aide de capteurs de conidies par impaction (type Rotorode) reliés à une minuterie Easy512-DA-RC (Moeller™) et placés à une hauteur de 40 centimètres du sol au centre des parcelles. Le dépistage a été fait du 30 juin 2006 au 20 septembre 2006 et du 6 juin 2007 au 28 septembre 2007. Quatre capteurs de conidies ont été installés dans chacun des dispositifs (2 par cultivar) et fonctionnaient 15 minutes à chaque heure de 10h00 à 18h00, trois fois par semaine les mardis, jeudis et dimanches. Cette période d'échantillonnage a été choisie, car la concentration de conidies dans l'air atteindrait un pic entre 14h00 et 16h00 selon Blanco *et al.* (2004). La durée d'échantillonnage était de deux heures et quinze minutes par jour, afin de réduire l'accumulation de grains de poussière sur la surface des bâtonnets d'échantillonnage (Carisse *et al.* 2005). Chaque échantillon était constitué de deux bâtonnets verticaux de 55,8 mm² de surface enduits de silicone et séparés par 8,45 centimètres, qui tournaient à 2 400 tours/minute (Carisse *et al.* 2005). Le volume d'échantillonnage était de 20,65 litres d'air par minute. Les bâtonnets étaient changés trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi), puis le dénombrement des conidies présentes sur chaque bâtonnet était fait au microscope à 250X sur toute la surface du bâtonnet et les résultats transformés en conidies/m²/heure:

$$\text{Conidies/m}^2/\text{heure} = \frac{(\text{Nombre de conidies par bâtonnet} \times 1000 \text{ litres m}^{-3})}{(20,65 \text{ litres/minute} \times 60 \text{ minutes/h} \times 2,25 \text{ heures})}$$

Les variables météorologiques ont été fournies par la station d'Environnement Canada située aux fermes de l'Acadie (2006) et de Frelighsburg (2007).

Dès l'apparition des premiers signes et symptômes sur les feuilles, l'intensité de la maladie a été répertoriée. L'intensité du blanc était estimée à l'aide de cotes de

0 à 5 correspondant au recouvrement (%) de la feuille par le blanc (tableau 2.1, chapitre 2) et pour lequel, 0 = pas de signe visible de blanc, 1 = moins de 10% de recouvrement par le blanc, 2 = 10% à 25%, 3 = 26% à 50%, 4 = 51% à 75%, 5 = plus de 75% (Viret *et al.* 1998). L'évaluation consistait en l'observation des deux faces, des trois folioles, des trois plus jeunes feuilles matures d'un plant, sur 10 plants par unité expérimentale, et choisis aléatoirement. L'intensité du blanc était notée une fois par semaine du 3 juillet au 27 septembre 2006 et du 13 juin au 2 octobre 2007 pour le cv. jour neutre 'Seascape', et du 11 juin au 2 octobre 2007 pour le cv. conventionnel 'Jewel'.

Pour le dernier volet de cette étude, le rendement en fruits (masse fraîche des fruits) de chaque cultivar a été estimé en 2007 (Frelighsburg). Pour le cultivar à jour neutre 'Seascape', la récolte a été faite une à deux fois par semaine du 31 juillet au 2 octobre 2007. Pour le cultivar conventionnel 'Jewel', quatre récoltes ont été faites, les 22 et 27 juin et les 3 et 12 juillet 2007. La récolte se faisait sur deux fois 1 mètre de long pour chaque parcelle et tous les fruits mûrs ont été amassés.

3.2.4 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS (Institut SAS Inc., Cary, NC, Version 9.1) et ExcelStat (XLSTAT Version 2008.3.01). L'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC) (Amsalem *et al.* 2006) a été calculée pour chaque cultivar et chaque régie de traitements à partir des valeurs d'intensité du blanc au cours des saisons 2006 et 2007.

$$\text{AUDPC} = \sum_{i=1}^{i=n} [(Y_{i+1} + Y_i)/2][t_{i+1} - t_i]$$

Où n = nombre total d'observations, Y = intensité de la $i^{\text{ième}}$ observation (en %), et t = temps (jours) depuis la dernière notation à la $i^{\text{ième}}$ observation (Carisse *et al.* 2005 ; Celio et Hausbeck, 1997; Gugino *et al.* 2007). L'AUDPC a été soumise à une analyse de variance à chaque année afin d'évaluer l'effet des différentes régies de traitements sur l'évolution de la maladie chez les deux cultivars (Amsalem *et al.* 2006). Une analyse de variance a également été faite sur le rendement. Les analyses ont été effectuées pour l'année 2006 chez le cultivar 'Seascape' (L'Acadie) et pour l'année 2007 chez les deux cultivars, 'Jewel' et 'Seascape' (Frelighsburg). L'analyse sur le rendement (masse fraîche des fruits mûrs) a été faite seulement en 2007.

3.3 Résultats

3.3.1 Intensité

Au cours des saisons 2006 et 2007, cinq régies de traitements ont été comparées pour leur effet sur l'intensité du blanc du fraisier chez un cultivar à jour neutre (Seascape) et un cultivar conventionnel (Jewel; saison 2006 seulement). En 2006 (L'Acadie), chez le cv. à jour neutre 'Seascape', l'intensité est demeurée près de 0 % jusqu'au 11 août. Une augmentation progressive a été observée chez le traitement témoin, pour atteindre l'intensité moyenne la plus élevée (3,3 %) le 8 septembre (figure 3.1 A). Pour les autres régies, une faible augmentation a été observée entre les 1^{er} et 11 septembre avec des valeurs maximales variant de 0,02 % à 0,4 %. La régie ayant exprimé la plus basse intensité au cours de toute la saison est le modèle degrés jours (Carisse). En 2007, aucun signe de blanc n'a été observé sur les feuilles de chacune des régies de traitements avant le 25 septembre. L'intensité est restée bien en dessous des valeurs de 2006 pour toute la saison, atteignant un maximum de 0,5 % le 2 octobre pour le modèle degrés jours (figure 3.1 B). Les moyennes d'intensité des autres régies étaient situées près de 0 %.

En 2007 (Frelighsburg), chez le cultivar conventionnel 'Jewel', l'intensité est demeurée à 0 % sous toutes les régies de traitements jusqu'au 14 août (figure 3.2). Par la suite, la moyenne est demeurée à de basses intensités (0,04 % à 0,5 %) pour toutes les régies de traitements, excepté le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs pour lequel l'intensité a atteint 5,6 % le 2 octobre. La régie de traitement ayant eu la plus basse intensité au cours de toute la saison est le modèle Gubler-Hoffman sans capteur.

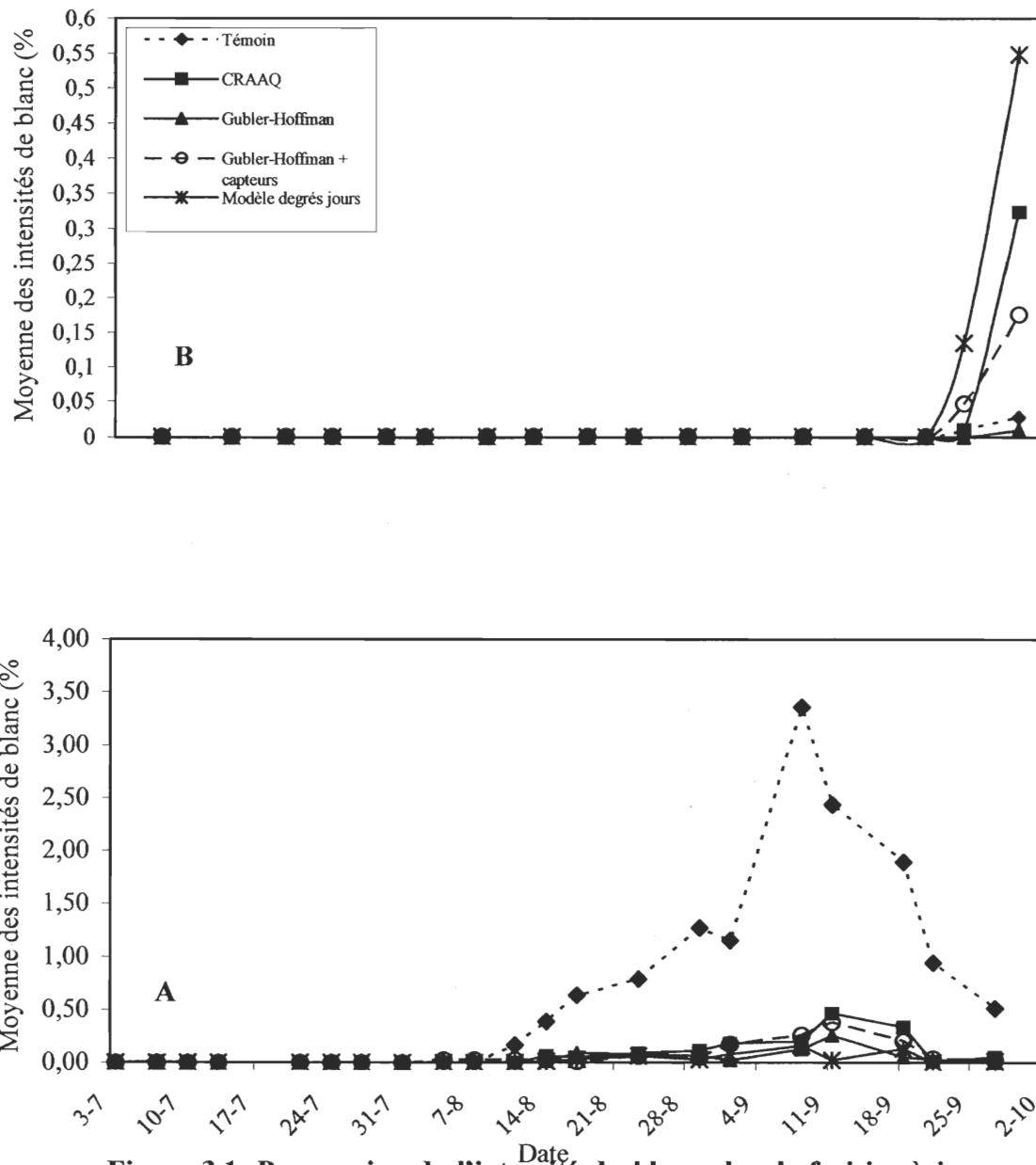


Figure 3.1. Progression de l'intensité du blanc chez le fraisier à jour neutre 'Seascape', selon cinq régies de traitements fongicides en 2006 à l'Acadie (A) et en 2007 à Frelighsburg (B).

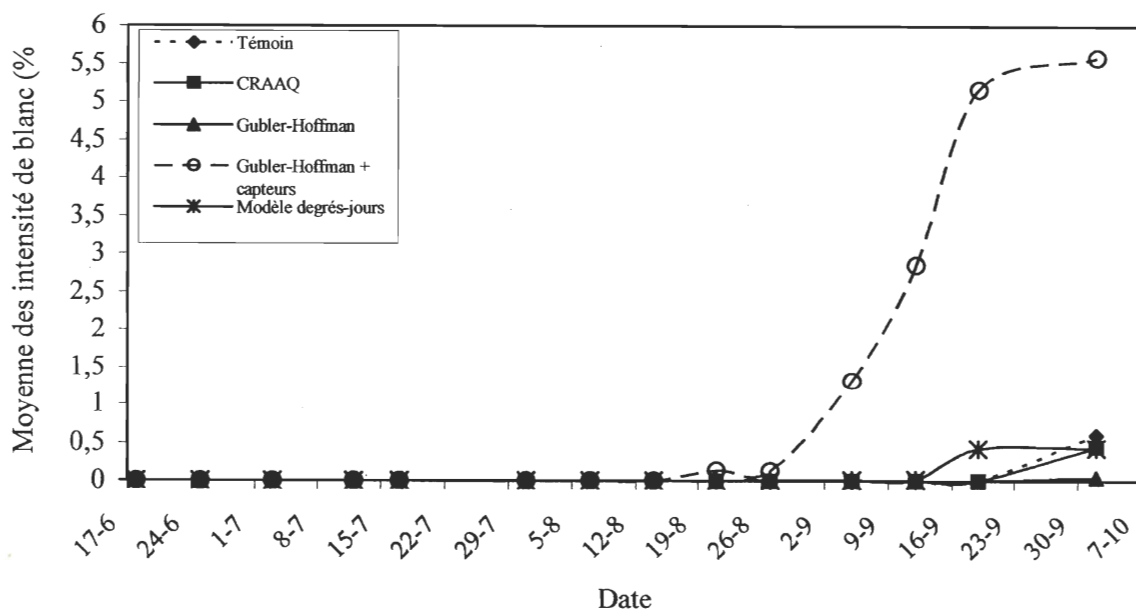


Figure 3.2. Progression de l'intensité du blanc chez le fraisier conventionnel 'Jewel', selon cinq régies de traitements fongicides en 2007 à Frelighsburg.

3.3.2 Analyses de variance

L'AUDPC et le nombre de traitements fongicides contre le blanc chez le cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en 2006 à l'Acadie et en 2007 à Frelighsburg sont présentés au tableau 3.5. Les résultats de 2006 démontrent que seul le traitement témoin sans fongicide était significativement différent des autres régies de traitements pour l'AUDPC (tableau 3.5). La régie de traitements ayant nécessité le moins d'applications (à l'exception du traitement témoin) est le modèle basé sur la pression de la maladie (indice de risque) et la concentration de conidies de blanc dans l'air, soit le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs avec trois traitements fongicides au cours de la saison 2006.

Contrairement à 2006, aucune différence significative n'a été obtenue entre les régies de traitements en 2007 (tableau 3.5) pour l'AUDPC. La régie de traitements ayant nécessité le moins d'applications est le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs de conidies avec un seul traitement fongicide au cours de la saison 2007. Le modèle degrés jours (Carisse) a demandé deux applications, la régie du CRAAQ en a reçu cinq et, six applications ont été faites pour le modèle Gubler-Hoffman sans capteur (tableau 3.5). De plus, la saison 2007 a nécessité en général moins d'applications de fongicides par type de régie que la saison 2006, allant jusqu'à deux traitements en moins pour le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs et le modèle degrés jours (tableaux 3.5).

L'AUDPC et le nombre de traitements fongicides contre le blanc chez le cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en 2007 à Frelighsburg sont présentés au tableau 3.6. L'AUDPC des régies de traitements n'a présenté aucune différence significative (tableau 3.6). Le traitement suivant le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs n'a reçu aucune application de fongicide au cours de la saison 2007, tout comme la régie témoin. Le modèle degrés jours a reçu une seule application, la régie du CRAAQ en a eu deux et, trois applications ont été faites pour le modèle Gubler-Hoffman sans capteur de conidies (tableau 3.6).

En 2007, l'ANOVA effectuée sur le rendement en fruits n'a montré aucune différence significative entre les régies de traitements chez les deux cultivars (tableaux 3.5 et 3.6).

Tableau 3.5. AUDPC, rendement et nombre de traitements fongicides en fonction des systèmes prévisionnels (régies de traitements) chez le cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en 2006 à l'Acadie et en 2007 à Frelighsburg.

Régies	Aire sous la courbe (AUDPC)		Rendement – masse fraîche des fruits (g/m)	Nombre total d'applications de fongicides	
	2006	2007	2007	2006	2007
TÉMOIN	61,6a*	0,15a	3169a	0	0
CRAAQ	7,1b	1,19a	3563a	5	5
Gubbler-Hoffman	3,3b	0,03a	3103a	5	6
Gubbler-Hoffman + capteurs	5,9b	0,89a	2776a	3	1
Degrés jours	2,5b	2,73a	2907a	4	2

* Une lettre commune signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements au seuil $\alpha=0,05$ (test de F).

Tableau 3.6. AUDPC, rendement et nombre de traitements fongicides en fonction des régies de traitements chez le cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en 2007 à Frelighsburg.

Régies	Aire sous la courbe (AUDPC)	Rendement – masse fraîche des fruits (g/m)	Nombre total d'applications de fongicides
TÉMOIN	3,85a*	2759a	0
CRAAQ	2,74a	3285a	2
Gubbler-Hoffman	0,24a	2893a	3
Gubbler-Hoffman + capteurs	118,63a	3127a	0
Degrés jours	7,12a	3710a	1

* Une lettre commune signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements au seuil $\alpha=0,05$ (test de F).

3.3.3 Indice de risque

Les traitements fongicides du modèle Gubler-Hoffman étaient faits en fonction d'un indice de risque tel que la température ou la concentration de conidies de blanc dans l'air. En 2006 (L'Acadie) chez le cultivar à jour neutre 'Seascape', l'indice selon la température a augmenté à compter du jour julien 109 (19 avril) pour atteindre le maximum de 100 au jour julien 121 (1^{er} mai) (figure 3.3). En 2007 (Frelighsburg), un patron semblable a été observé pour ce qui est de l'augmentation de l'indice chez le cultivar 'Seascape'. En revanche, l'indice 100 a été atteint plus tard en 2007 qu'en 2006, soit au jour julien 156 (5 juin). Par la suite, l'indice est demeuré élevé toute la saison (figure 3.3). Pour le cultivar conventionnel 'Jewel' en 2007 à Frelighsburg, l'indice 100 a été atteint au jour julien 132 (12 mai). Une baisse de l'indice a débuté aux alentours du jour julien 140 (20 mai) pour redescendre jusqu'à un indice de 20, puis remonter jusqu'à 100 (jour julien 146) et osciller entre 80 et 100 pour le reste de la saison (figure 3.4).

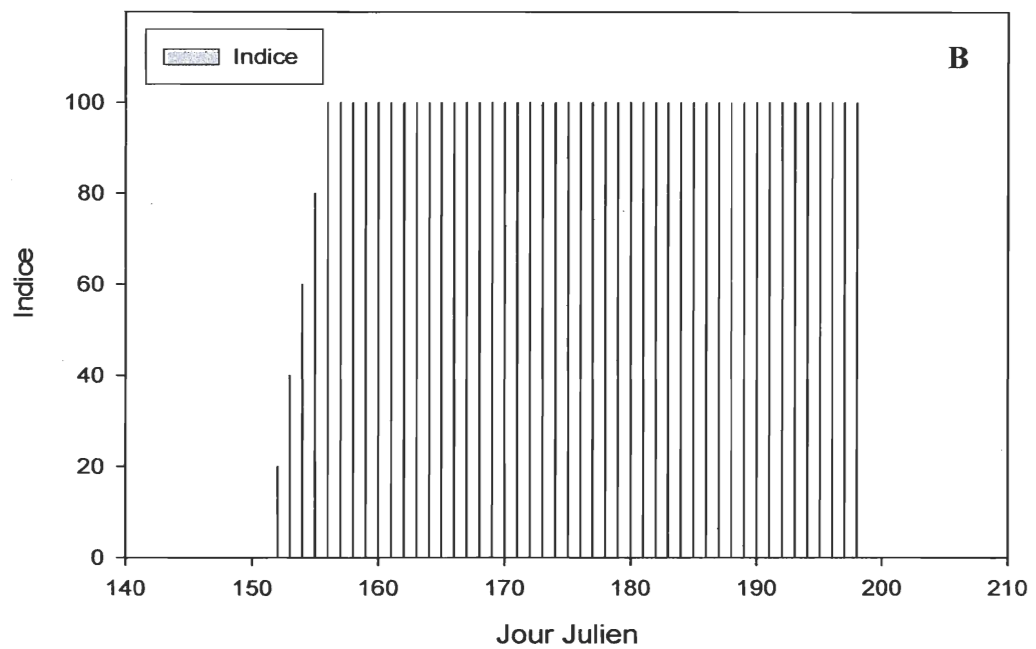
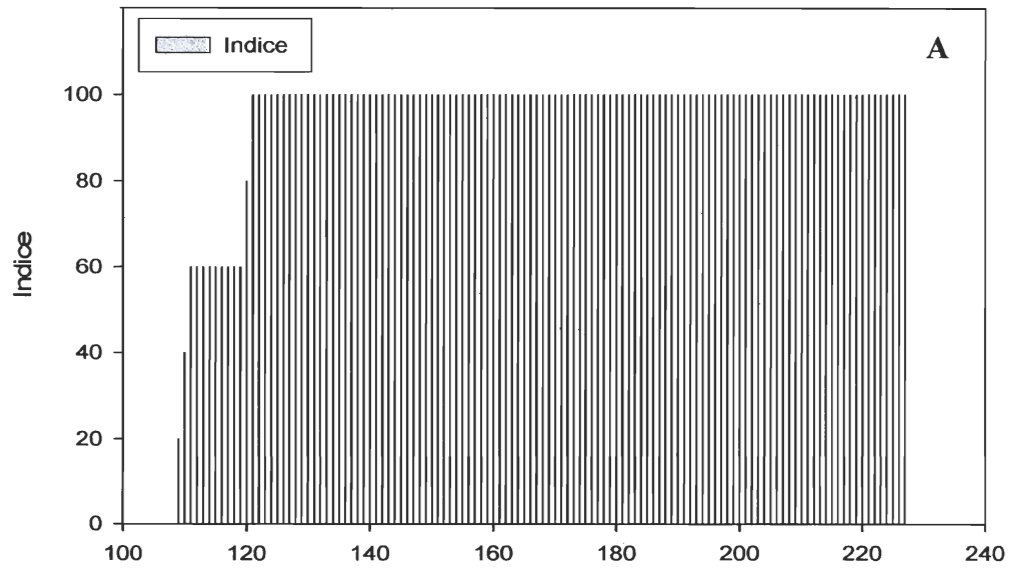


Figure 3.3. Indice de risque du blanc de Gubler-Hoffman chez le cultivar de fraisier à jour neutre 'Seascape' en fonction des jours juliens en 2006 à l'Acadie (A) et en 2007 à Frelighsburg (B).

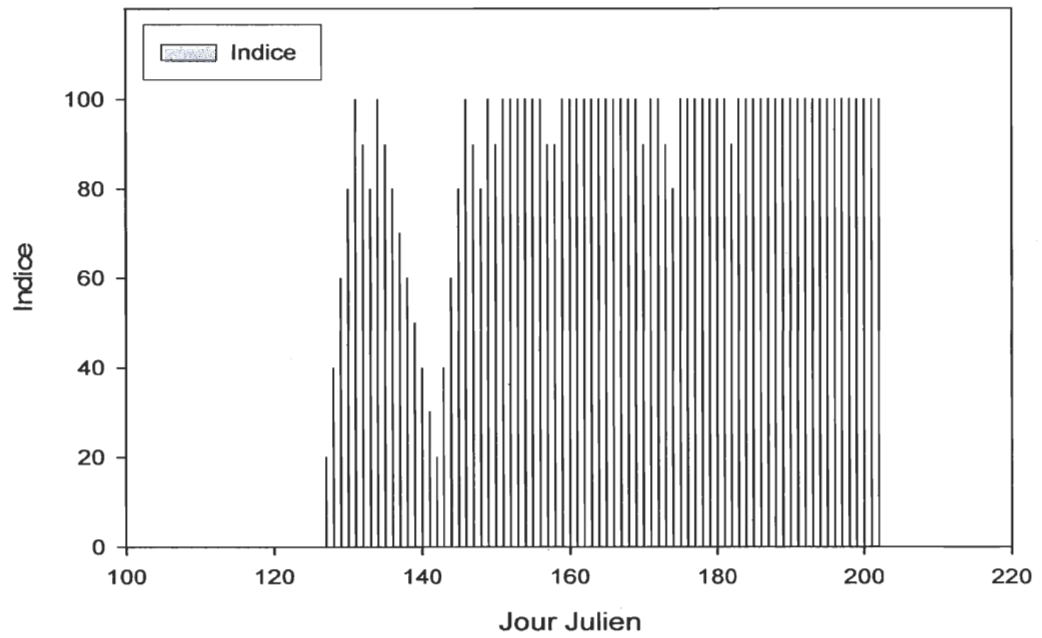


Figure 3.4. Indice de risque du blanc de Gubler-Hoffman chez le cultivar de fraisier conventionnel 'Jewel' en fonction des jours juliens en 2007 à Frelighsburg.

3.4 Discussion

L'objectif de cette étude était de comparer et d'évaluer des systèmes prévisionnels du blanc développés chez le fraisier ou d'autres cultures afin d'améliorer la lutte chimique. Au regard des résultats, aucune régie de traitements ne s'est démarquée de façon nette pour ce qui est de l'intensité du blanc sur les feuilles de fraisier durant les deux saisons (tableaux 3.5 et 3.6). En revanche, la régie de traitements ayant nécessité le moins d'applications de fongicides, autre que le traitement témoin, au cours des deux années, est le modèle Gubler-Hoffman avec capteurs de conidies, et ce chez les deux cultivars conventionnel ou jour neutre. Il est donc possible de croire que l'utilisation de l'estimation de la quantité d'inoculum (concentration de conidies) dans l'air afin de décider du moment d'application des fongicides serait un bon outil de gestion pour réduire le nombre de traitements fongicides contre le blanc du fraisier.

Par ailleurs, la régie de traitement suivant les recommandations du CRAAQ (CRAAQ, 2008), ainsi que le modèle de Gubler-Hoffman sans capteur sont beaucoup trop conservateurs. Ces régies ont nécessité un grand nombre d'applications de fongicides, même en situation de peu de conidies de blanc dans l'air (tableaux 3.5 et 3.6). Pour ce qui est du modèle de Gubler-Hoffman sans capteur, l'indice de risque maximum de 100 a été atteint très tôt et est demeuré élevé pendant presque toute la saison (figures 3.3 et 3.4). Conséquemment, puisque l'indice de risque est calculé à partir de la température et que l'initiation des applications de fongicides dépend de cet indice de risque, le modèle de Gubler-Hoffman sans capteur a mené à un nombre total élevé d'applications. Ces résultats confirment qu'un système prévisionnel basé uniquement sur la température n'est pas complet et que l'incorporation d'autres facteurs (paramètres) contribuerait à affiner ce dernier (Hoffman et Gubler, 2002).

Malgré cela, la température reste un facteur de première importance influençant la croissance du champignon du blanc, la sporulation, le relâchement des conidies dans l'air, le dépôt des conidies (inoculation) et la germination des conidies. Tout d'abord, la température optimale observée pour le développement du blanc chez différentes cultures est généralement plus basse que chez les autres agents pathogènes fongiques, soit environ 21°C (Butt, 1978, cité par Byrne *et al.* 2000). Cette observation concorde avec le fait que le modèle de Gubler-Hoffman mentionne qu'il y a un risque d'épidémie sous des températures entre 18°C et 27°C (Hoffman et Gubler, 2002). D'autres modèles rapportent des températures optimales de germination des conidies du blanc entre 22°C et 27°C (Miller *et al.* 2003). Puis, le développement du blanc est ralenti en dessous et au-dessus des températures optimales (Xu, 1999). Chez le blanc de la rose, *Sphaerotheca pannosa* var. *rosae*, le profil de température optimale de croissance présente des similarités avec le profil de température et de développement du blanc du fraisier (Miller *et al.* 2003). Cet intervalle de température affecte et influence plusieurs aspects de la dynamique de développement de la maladie : le nombre des infections réussies, soit le nombre et la taille des colonies visibles, le taux de croissance et d'expansion de la colonie, et la sporulation, soit le nombre de spores produites par lésion pendant sa durée de vie (Xu, 1999). À des températures supra optimales, la mortalité des conidies augmente et le taux de développement du blanc diminue, tandis que le développement (maturité) de la plante hôte est favorisé, ce qui diminue sa sensibilité à l'infection (résistance ontogénique), comme observé au chapitre 2 (Mence et Hildebrandt, 1966, cités par Doster et Schnathorst 1985).

Pour la répression du blanc chez d'autres cultures que le fraisier, plusieurs systèmes prévisionnels basés sur les conditions météorologiques telles que la température, l'humidité relative et la pression de vapeur, la vitesse du vent ou la pluviométrie, ont été développés (Blanco *et al.* 2004) : c'est le cas pour le blanc de la vigne (Carisse et Bacon, 2004; Chellemi et Marois, 1991; Sall, 1980) et le

blanc du pommier (Xu, 1999). Ainsi, les applications de fongicides sont couramment basées sur des variables météorologiques, tandis que le risque réel d'épidémie mesuré par la concentration de spores d'Oomycètes et d'Eumycètes dans l'air n'est pas pris en compte pareillement (Diaz *et al.* 1997). L'inoculum (conidies) dans l'air est reconnu comme étant d'une grande importance dans le développement de maladies polycycliques (Carisse *et al.* 2005), telles que le blanc. Le piège à spores est souvent utilisé afin d'étudier l'épidémiologie d'une maladie (Campbell et Madden, 1990) et plusieurs affirment qu'il existe une association entre l'épidémiologie du blanc et cette concentration de spores dans l'air (Schoeman *et al.* 1995; Xu et Robinson, 2000, cités dans Miller *et al.* 2003). Les paramètres qu'on en retire sont la concentration de conidies dans l'air, ainsi que le moment dans la journée où les spores sont relâchées (Lacey, 1996). Ces paramètres permettent par la suite de faire des corrélations avec les conditions météorologiques (Lacey, 1996). Par exemple, Smith et Davies (1973) ont travaillé sur un modèle empirique pour le blanc de l'orge en fonction des conditions météorologiques et des spores piégées dans l'air. D'après leurs études, les conditions météorologiques peuvent influencer le relâchement des spores et leur capture. Puis, les conditions météorologiques auront une influence sur l'infection en faisant varier le taux de déposition des spores. Leur modèle pourrait donc prévoir la quantité de spores de blanc de l'orge dans l'air en fonction de la température et du vent (Smith et Davies, 1973).

Jeger (1984) a utilisé la capture (piège) de spores afin de développer un modèle pour prédire la progression du blanc et de la tavelure chez le pommier. Mathématiquement, les comptes cumulatifs des spores correspondent à l'intensité de la maladie (Zadoks, 1974, cité par Jeger, 1984). Puis, d'après Blanco *et al.* (2004), dans une recherche sur le blanc du fraisier, des corrélations positives entre la présence des conidies et l'incidence du blanc du fraisier, indiquent que des concentrations plus élevées de conidies entraînent une incidence plus forte de la maladie, si les conditions météorologiques permettent à l'agent pathogène de

s'établir sur les tissus sensibles. En revanche, si par la suite un des facteurs météorologiques qui influencent la germination des conidies n'est plus optimal, l'incidence de la maladie diminue (Blanco *et al.* 2004). Toujours selon Blanco *et al.* (2004), les facteurs météorologiques peuvent être considérés responsables de l'augmentation du nombre de conidies piégées en période de récolte et conséquemment, de l'augmentation de l'incidence du blanc.

En définitive, l'étude de l'épidémiologie du blanc du fraisier montre qu'un système prévisionnel n'utilisant que la température n'est pas complet. Puisque l'indice de risque maximal (100) est atteint dès le début juin, la température ne peut être la seule variable déterminante de la quantité de conidies de blanc dans l'air. Ainsi, le modèle de Gubler-Hoffman sans capteur n'est pas applicable comme tel sous les conditions de la région de Québec. Bien que le blanc puisse être réprimé par des produits fongicides appliqués de façon régulière, les traitements ne sont pas nécessaires si les conditions environnementales ne sont pas favorables au développement de la maladie et si la quantité de conidies dans l'air (inoculum) est nulle, négligeable ou très faible. Ainsi, le suivi de la concentration de conidies combiné à des mesures météorologiques peut aider à la prise de décision du moment d'application des fongicides (Diaz *et al.* 1997). L'adoption d'une stratégie de lutte basée sur la mesure de l'inoculum pourrait permettre à plus long terme de réduire le nombre de traitements et la quantité de fongicides utilisés contre le blanc du fraisier chez les cultivars conventionnels et à jour neutre.

Chapitre 4

Application de l'analyse par arbre de classification aux relations entre les conditions météorologiques et la concentration aérienne de conidies de *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae*, le blanc du fraisier, à l'Île d'Orléans

Résumé

Il est reconnu qu'un ensemble de paramètres météorologiques a un effet sur la concentration des conidies du blanc dans l'air. L'analyse par arbre de classification a permis d'établir la base d'un système prévisionnel pour la gestion du blanc du fraisier dans la région de Québec (Île d'Orléans) en 2006-07 à partir d'un ensemble de données météo (température, humidité relative, précipitations). Une variable cible, la concentration de conidies dans l'air, peut être prédite en utilisant des variables météorologiques. L'analyse par arbre de classification a permis de mettre en évidence les variables météorologiques ayant un fort impact sur la concentration de conidies du blanc sont l'humidité relative moyenne, la température moyenne et les températures maximale et minimale quotidiennes. À notre connaissance, la présente étude constitue la première application d'un modèle d'arbre de classification à l'estimation de concentrations de conidies anémophiles et à la maladie du blanc. L'arbre de classification basé sur les variables les plus discriminantes, permet de prédire correctement le risque de blanc selon la concentration de conidies dans 40 à 71% des cas selon la concentration de conidies. Cet arbre de classification pourra être amélioré lorsque davantage de données seront disponibles. Le taux de prédiction (70,6 %) de la catégorie de concentration de conidies la plus faible (CAT1) se compare aux efficacités des modèles d'arbre de classification d'autres études.

4.1 Introduction

Le blanc du fraisier, causé par *S. macularis* f. sp. *fragariae*, peut occasionner des pertes économiques importantes aux producteurs et pour le moment, les traitements fongicides sont effectués en fonction du stade de développement des plants, de la sensibilité des cultivars et des conditions météorologiques. Par ailleurs, la concentration de l'inoculum aérien, évaluée par capteur de conidies, permet d'estimer le risque potentiel de la maladie durant toute la saison (voir chapitre 3) et pourtant, très peu d'étude aérobiologique a été faite sur le blanc du fraisier au Québec. Ce type d'étude permettrait d'avoir une meilleure connaissance de la biologie et de l'épidémiologie de l'agent pathogène et contribuerait au développement d'un programme de lutte chimique, limitant le nombre d'applications de fongicides lorsque le risque de la maladie est faible (Blanco *et al.* 2004; Chapitre 3). Étant donné que la production de spores influence l'effet d'un agent pathogène sur son hôte et que les techniques pour capter les spores sont bien développées, il est surprenant que la relation entre la progression d'une maladie (comme le blanc du fraisier) et la production de spores ne soit pas mieux comprise (Jeger, 1984).

On sait que les conditions météorologiques affectent le relâchement et la germination des conidies (du blanc) sur les feuilles et les fruits du cerisier par exemple (Grove, 1998). En revanche, pour le blanc du fraisier, peu d'information est disponible sur l'effet des conditions environnementales sur la concentration des conidies anémophiles. Miller *et al.* (2003) ont décrit le développement du blanc du fraisier en fonction de la température et de l'humidité relative en conditions contrôlées et ils ont précisé les conditions optimales de croissance du champignon. Puis, Blanco *et al.* (2004) ont déterminé la relation entre les conditions environnementales, la périodicité diurne de la concentration des conidies de *S. macularis* dans l'air et l'incidence du blanc du fraisier.

La présente recherche innove par l'examen de la relation entre la concentration de conidies aériennes du blanc et les conditions météorologiques par l'analyse par arbre de classification (Sherrod, 2003). Un arbre de classification est un modèle logique représenté de façon binaire, c'est-à-dire par un embranchement mère qui se divise successivement en deux embranchements filles. Le fractionnement permet de construire un arbre qui peut être utilisé pour prédire la contribution relative de la variable cible, telle la concentration de conidies de blanc dans l'air, par un ensemble de variables de prédiction, telles les variables météorologiques. Ainsi, une grande quantité de données est nécessaire afin d'affiner le modèle.

Quelques applications de l'analyse par arbre de classification sont rapportées en épidémiologie végétale. Sur la base de caractéristiques physiques et chimiques du sol, un modèle d'arbre de classification a été développé pour des sols qui présentaient un hyphomycète antagoniste du nématode à kystes du soja (Kim *et al.* 1998). Au moyen de l'analyse par arbre de classification, Kim *et al.* (2002) ont examiné la précision de modèles d'estimation de la durée d'humectation des feuilles, facteur influençant la présence et l'intensité d'une maladie foliaire. Kelly et Meentemeyer (2002) ont développé un modèle d'arbre de classification pour estimer le risque de mortalité associée à la maladie de l'encre du chêne rouge. Enfin, sur la base de caractéristiques culturales en pré-semis et de caractéristiques des cultivars, dont la sensibilité à la maladie, un modèle d'arbre de classification a estimé le risque de taches grises du maïs en fin de saison (Paul et Munkvold, 2004).

L'analyse par arbre de classification pourrait contribuer à la répression du blanc chez le fraisier par une simple évaluation visuelle, sans calcul. De plus, l'arbre de classification est accessible et d'interprétation facile.

L'arbre de classification permettra : 1) de visualiser l'importance relative des nombreuses conditions météorologiques qui affectent la concentration des conidies du blanc du fraisier dans l'air et, 2) d'augmenter la précision des indices de risque du blanc en intégrant plusieurs paramètres météorologiques. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de prédire la concentration aérienne de conidies du *S. macularis* f. sp. *fragariae* en fonction de différentes variables météorologiques et ce, en utilisant la quantité de conidies dans l'air comme variable de départ et un modèle d'arbre de classification.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Parcelles expérimentales

L'échantillonnage de la capture des conidies de blanc dans l'air a été effectué dans des fraisières commerciales du cultivar à jour neutre 'Seascape' à la Polyculture Plante à Sainte-Pétronille, Île d'Orléans en 2006 et 2007, et des fraisières des cultivars conventionnels 'Jewel' et 'Darselect' à la ferme Onésime Pouliot à Saint-Jean, Île d'Orléans, en 2006 et 2007 respectivement. Vu la faible intensité ou pression de maladie en 2006 chez le cultivar 'Jewel', celui-ci a été remplacé par le cultivar 'Darselect' en 2007. L'échantillonnage de conidies a été fait pour les deux saisons de culture de mai à octobre. Les cv 'Seascape' et 'Darselect' étaient cultivés en rang double sur des buttes avec paillis de plastique noir, tandis que le cv 'Jewel' était cultivé en rangs nattés.

Une unité expérimentale était constituée d'un champ de 36 m de large par 64 m de long pour chacun des cultivars en 2006 et 2007. Les parcelles ont été traitées selon la régie recommandée par le Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2008).

4.2.2 Collecte des données

La concentration de conidies dans l'air a été estimée (par échantillonnage ou dépistage) à l'aide de capteurs de conidies par impaction de type ROTOROD reliés à une minuterie Easy512-DA-RC de Moeller™ et placés à une hauteur d'environ 30 centimètres du sol au centre des parcelles. En 2006, le dépistage a été fait du 26 mai au 2 octobre en continu chez 'Seascape', tandis qu'il a été arrêté du 26 juillet au 18 août chez 'Jewel' pour la rénovation. En 2007, la capture de conidies a été faite du 21 mai au 17 septembre chez 'Seascape' et du 21 mai au 25 juillet chez 'Darselect'. Un capteur de conidies a été utilisé sur chaque ferme en 2006 et deux capteurs par ferme ont été utilisés en 2007. Les capteurs échantillonnaient 15 minutes à chaque heure de 10h00 à 18h00, trois fois par semaine les mardis, jeudis et dimanches. Cette période d'échantillonnage a été choisie, car la concentration de conidies dans l'air atteindrait un pic entre 14h00 et 16h00 selon Blanco *et al.* (2004). Le temps d'échantillonnage était de deux heures et quinze minutes par jour, afin de réduire l'accumulation de grains de poussière sur la surface des bâtonnets d'échantillonnage (Carisse *et al.* 2005). Chaque échantillon était constitué de deux bâtonnets verticaux de 55,8 mm² de surface enduits de silicone et séparés par 8,45 centimètres, qui tournaient à 2 400 tours/minute (Carisse *et al.* 2005). Le volume d'échantillonnage était de 20,65 litres d'air par minute. Les bâtonnets étaient changés trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi), puis le dénombrement des conidies sur chaque bâtonnet était fait au microscope à 250X sur toute la surface du bâtonnet et les résultats transformés en conidies/m²/heure:

$$\text{Conidies/m}^2/\text{heure} = \frac{(\text{Nombre de conidies par bâtonnet} \times 1000 \text{ litres m}^{-3})}{(20,65 \text{ litres/minute} \times 60 \text{ minutes/h} \times 2,25 \text{ heures})}$$

Les variables météorologiques étaient enregistrées en continu de mai à septembre. La température a été mesurée à l'aide de thermocouples de type T (cuivre-constantin de Oméga), l'humidité relative de l'air au niveau du couvert végétal était enregistrée avec un acquiiseur de données (Campbell Scientific, modèle CR10X),

la durée d'humectation des feuilles était mesurée par des sondes plates (Campbell Scientific, modèle 237) recouvertes de deux couches de peinture de latex blanche et installées au niveau du couvert végétal avec un angle de 45°. La durée des précipitations était estimée par un pluviomètre muni d'un Hobo® Event qui permettait de recueillir une valeur à chaque 0,2 mm de pluie.

Les variables météorologiques de base ont été utilisées afin de construire de nouvelles variables (minimum, maximum, moyenne, etc.) pour les fins de l'analyse par arbre de classification (tableau 4.1). Ainsi, la température, l'humidité relative et la pluviométrie ont permis de créer de nouvelles variables basées sur l'épidémiologie et la biologie du blanc du fraisier, telles que le nombre d'heures quotidiennes sous des températures de 30°C, puisqu'une diminution marquée du développement de l'agent pathogène est observée au dessus de 30°C (chapitre 1).

4.2.3 Analyses de données

Des catégories ont été créées à partir des valeurs de concentrations de conidies transformées en \log_{10} . Quatre catégories ont été formées : CAT1 : $\log[\text{conidies}] \leq 1$; CAT2 : $1 < \log[\text{conidies}] \leq 2$; CAT3 : $2 < \log[\text{conidies}] \leq 3$; CAT4 : $\log[\text{conidies}] > 3$. La corrélation entre les catégories de concentrations de conidies en \log_{10} (tableau 4.3) et les variables météorologiques construites a été examinée à l'aide d'un test de corrélation (SAS, Institut SAS Inc., Cary, NC, Version 9.1). L'analyse par arbre de classification a été faite à l'aide du logiciel DTREG (Sherrod, 2003). Un arbre construit par DTREG maximise l'hétérogénéité des catégories de la variable cible (Sherrod, 2003). Vingt-huit variables météorologiques de base (température, humidité relative et pluviométrie) et construites (tableau 4.1) ont été utilisées comme variables de prédiction. L'ensemble des variables de prédiction subit une division binaire; la première variable formant le premier nœud est définie comme la variable explicative qui minimise le taux de mauvaises classifications

(Sherrod, 2003). Par la suite, les variables les moins discriminantes d'après l'analyse par arbre de classification ont été retirées une à une du modèle afin d'obtenir un équilibre entre la complexité de l'arbre et la meilleure classification; le tout, pour optimiser les bonnes classifications et minimiser les mauvaises. Ce qui veut dire qu'à chaque construction d'un arbre, les variables ayant une contribution relative au modèle de moins de 25 % sont retirées.

4.3 Résultats

4.3.1 Concentration de conidies

Les valeurs des concentrations de conidies observées au début du mois d'août chez 'Seascape' (Polyculture Plante) en 2006 varient de 0 conidie/m³/h par jour à plus de 6000 conidies/m³/h par jour (figures 4.1 B). Chez le cultivar conventionnel 'Jewel' (ferme Onésime Pouliot) en 2006, la capture quotidienne de conidies est restée très faible en juin et juillet, avec une moyenne de concentration de 3 conidies/m³/h. Après la rénovation, effectuée du 26 juillet au 18 août 2006, les captures ont augmenté, pour atteindre une moyenne de 150 conidies/m³/h (figure 4.1 A). Chez 'Seascape' (à jour neutre) en 2006, la capture quotidienne de conidies a été plus élevée (figure 4.1 B) que chez le cv conventionnel 'Jewel' (figure 4.1 A) avec une moyenne de concentration modérée de 235 conidies/m³/h. Un pic a été atteint chez 'Seascape' (à jour neutre) le 2 août 2006 avec un compte de 6045 conidies/m³/h, puis la concentration a rapidement diminué (figure 4.1 B). Chez le cultivar conventionnel 'Darselect', la concentration de conidies a été plus élevée en 2007 (figure 4.2 A) que chez l'autre cv conventionnel 'Jewel' en 2006 (figure 4.1 A), tandis que chez le cultivar à jour neutre 'Seascape', la concentration a été beaucoup plus faible en 2007 qu'en 2006 (figures 4.2 B et 4.1 B respectivement). En 2007, la moyenne de captures chez 'Darselect' était modérée avec 295 conidies/m³/h, atteignant un maximum de 1050 conidies/m³/h le 2 juillet (figure 4.2 A). Chez 'Seascape', le compte n'a pas dépassé 86 conidies/m³/h avec une moyenne de 19 conidies/m³/h (figure 4.2 B).

Tableau 4.1. Variables météorologiques construites pour l'analyse par arbre de classification pour la prévision de la concentration de conidies du blanc du fraisier à l'Île d'Orléans en 2006-2007.

		Variables construites						
Variables de base	Température	minimale	maximale	moyenne quotidienne		moyenne de jour (6h-20h)		Autres variables
		cumulative des 5 j précédents	cumulative des 5 j précédents	cumul. des 5 j précédents	cumul. des 2 j précédents	cumulative des 5 j précédents	Nb d'heures quot. avec T>30°C	Nb d'heures cumul. des 5 j précédents avec T>30°C
	Humidité relative	min.	moyenne quotidienne		moyenne de jour (6h-20h)		Autres variables	
		max.	cumulative des 5 j précédents	cumul. des 5 j précédents	cumulative des 5 j précédents	Nb d'heure quot. avec HR>60%	Nb d'heures cumul. des 5 j précédents avec HR>60%	Nb d'heures quot. avec HR>80%
	Pluie	mm quot. total	Nb d'heures de pluie quot. cumul. des 5 j précédents		Nb d'heures de pluie de jour		Nb d'heures de pluie de jour cumul. des 5 j précédents	
			Nb d'heures quot. de pluie					

4.3.2 Arbre de classification

Une corrélation positive significative a été obtenue entre les catégories (4 catégories décrites dans le tableau 4.3) de concentrations de conidies en \log_{10} et le nombre total d'heures sous une température de 30°C au cours des 5 jours précédents, ainsi que la moyenne cumulative de l'humidité relative des 5 jours précédents (tableau 4.2). Puis, une corrélation négative significative a été obtenue entre les catégories de concentration de conidies en \log_{10} et l'humidité relative quotidienne maximale (tableau 4.2).

L'analyse par arbre de classification est présentée à la figure 4.3. L'humidité relative moyenne de plus de 70 % est la première variable météorologique servant de règle de décision qui permet de prédire la concentration de conidies de blanc dans l'air. Une température maximale quotidienne de 19°C, une température minimale quotidienne de 12°C, une température moyenne de 20°C, le nombre total d'heures dans la journée sous une humidité relative > 60 %, une humidité relative moyenne de jour (6h – 20h) de 84 %, ainsi qu'une température minimale quotidienne de 17°C, sont toutes des variables météorologiques qui servent de règles de décision dans l'arbre de classification. La combinaison des conditions météorologiques quotidiennes correspondant aux variables de l'arbre de classification permettra la prédiction d'une concentration de conidies de blanc dans l'air faible, moyenne, élevée ou très élevée. Deux ensembles de combinaisons prédisent une concentration élevée de conidies (CAT3), soit une humidité relative moyenne > 70 %, jumelée à une température maximale > 19°C, une température minimale $\leq 12^\circ\text{C}$ et une température moyenne $\leq 20^\circ\text{C}$, ou une humidité relative moyenne > 70 %, jumelée à une température maximale > 19°C, une température minimale > 12°C, moins de 20 heures quotidiennes d'humidité relative > 60 %, en plus d'une humidité relative moyenne de jour $\leq 84\%$ et une température minimale $\leq 17^\circ\text{C}$ (figure 4.3).

Cet arbre de classification a été formé à l'aide de 12 variables de prédiction, dont sept ont montré une contribution de plus de 27 % dans l'analyse (figure 4.4). Les trois premières variables dont la contribution est de plus de 75 % concernent l'humidité relative (figure 4.4). Pour ce qui est de la validation des données, le modèle de l'arbre de classification a permis de prédire correctement en moyenne 53 % des données disponibles pour l'analyse (tableau 4.3). La catégorie de concentration de conidies CAT1 a été la plus facilement prédite avec plus de 70 % de prédictions correctes, tandis que la catégorie CAT3 a obtenu près de 50 % de prédictions correctes (tableau 4.3).

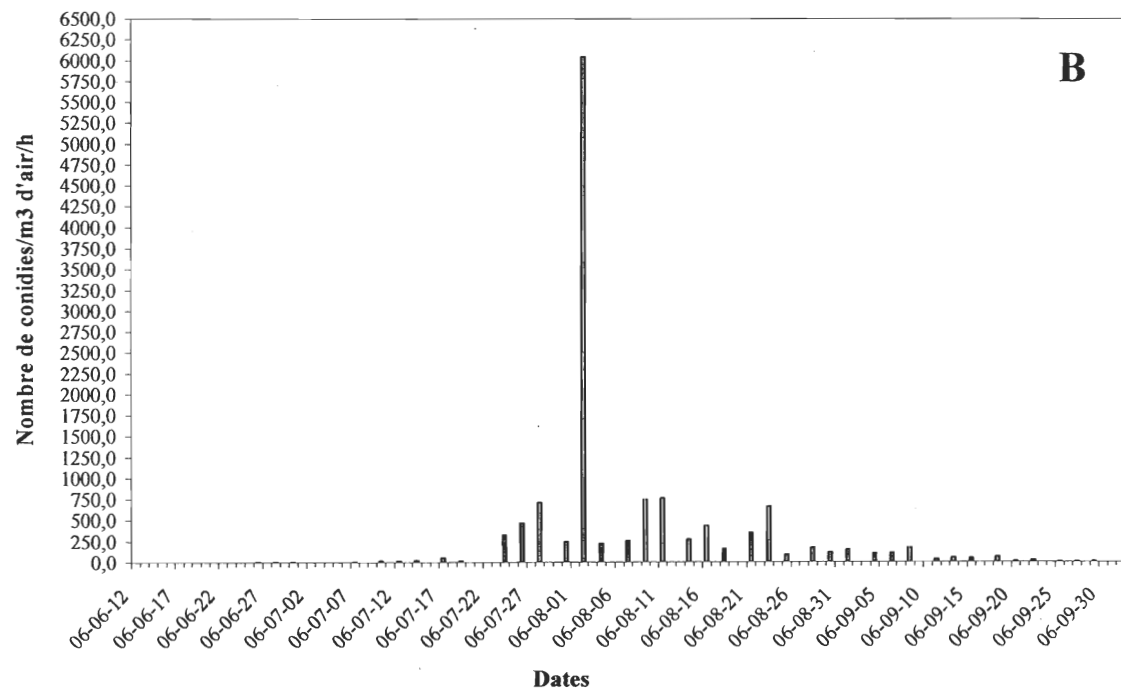
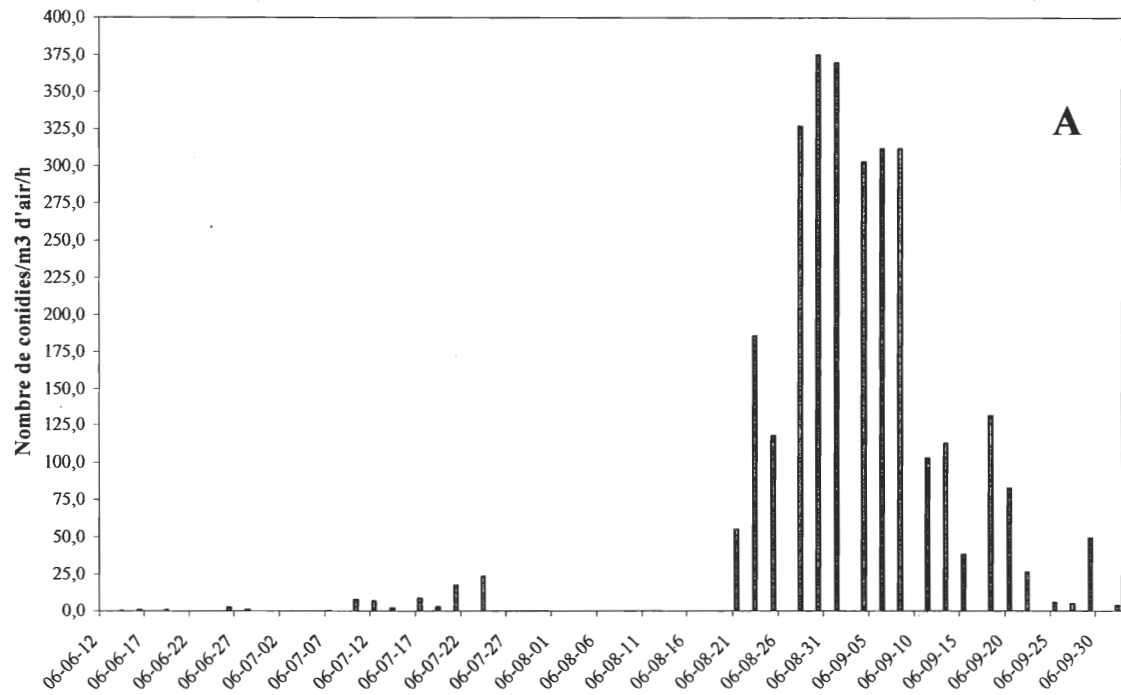


Figure 4.1. Variation du nombre de conidies du blanc du fraisier dans l'air (conidies/m³/heure), chez le cultivar conventionnel 'Jewel' (A) (ferme Onésime Pouliot) et du cultivar à jour neutre 'Seascape' (B) (Polyculture Plante), à l'Île d'Orléans en 2006. L'échantillonnage était fait 3 fois par semaine.

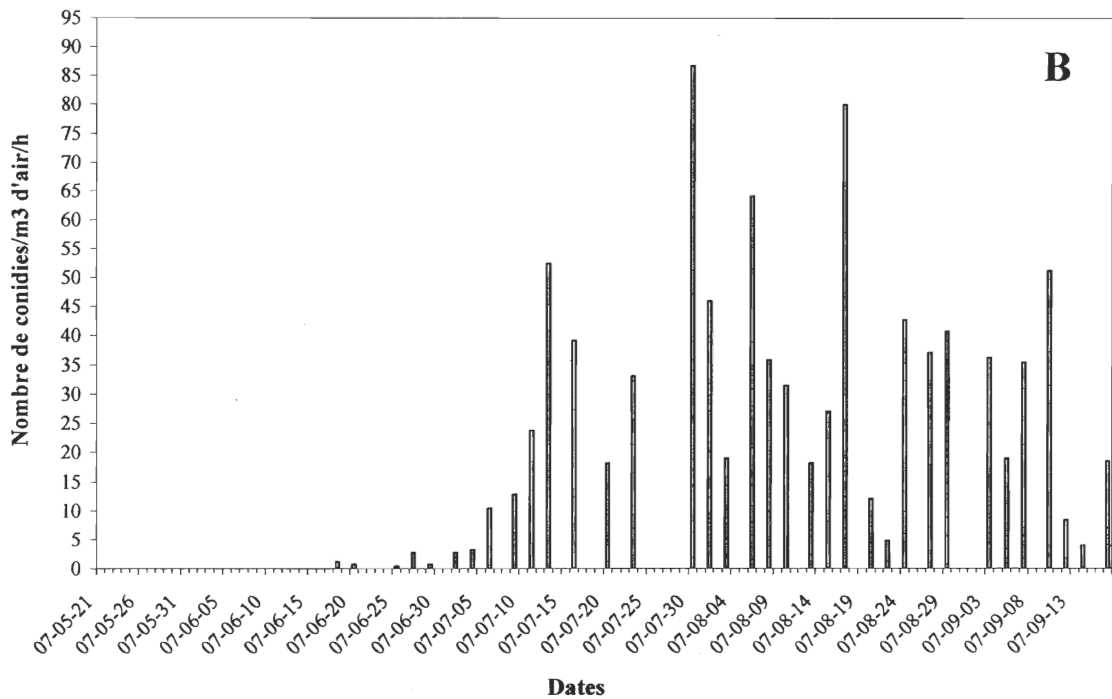
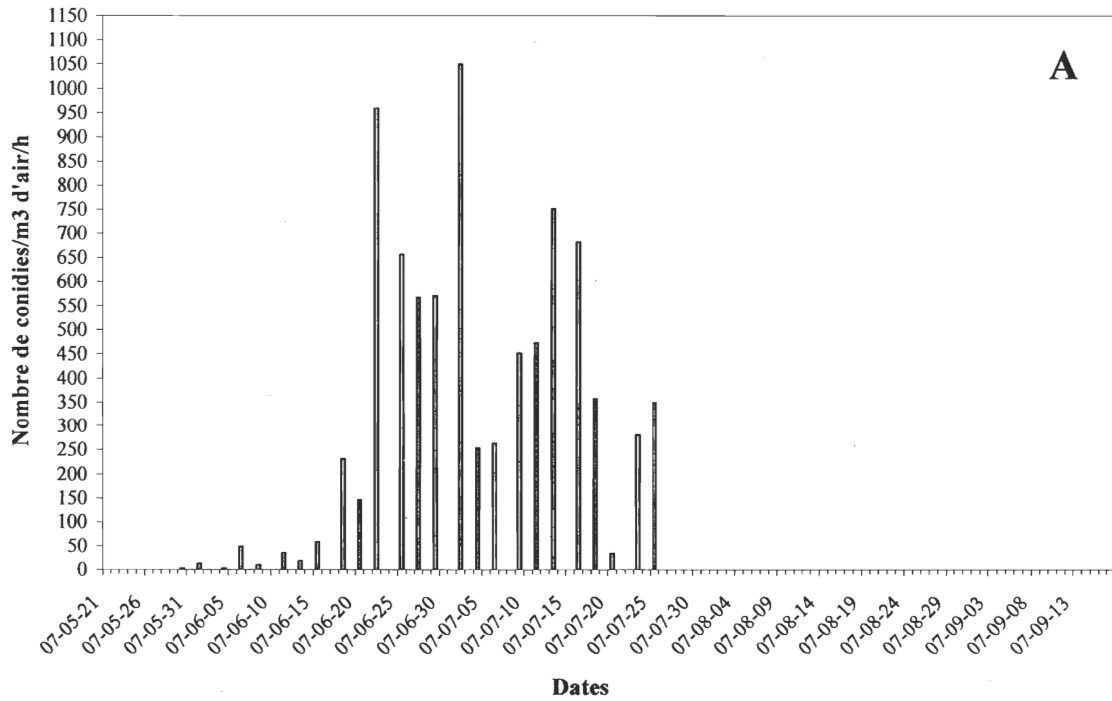


Figure 4.2. Variation du nombre de conidies du blanc du fraisier dans l'air (conidies/m³/heure), chez le cultivar conventionnel 'Darselect' (ferme Onésime Pouliot) (A) et chez le cultivar à jour neutre 'Seascape' (Polyculture Plante) (B) à l'Île d'Orléans en 2007. L'échantillonnage était fait 3 fois par semaine.

Tableau 4.2. Corrélations entre les catégories de la concentration dans l'air de conidies de *S. macularis* f. sp. *fragariae* en \log_{10} et les variables météorologiques significatives de l'analyse par arbre de classification.

	Nbh30C5j²	HRmoyj5jcum³	HRmax⁴
CAT¹ [conidies]	-0,19473	-0,21508	0,19692
	0,0189* ⁵	0,0094*	0,0154*

¹Catégorie de la concentration de conidies en \log_{10}

²Nombre total d'heures avec des températures > 30°C des 5 jours précédents

³Moyenne cumulative de l'humidité relative des 5 jours précédents

⁴Humidité relative quotidienne maximale

⁵* = significatif au seuil $\alpha = 0,05$ (test de F)

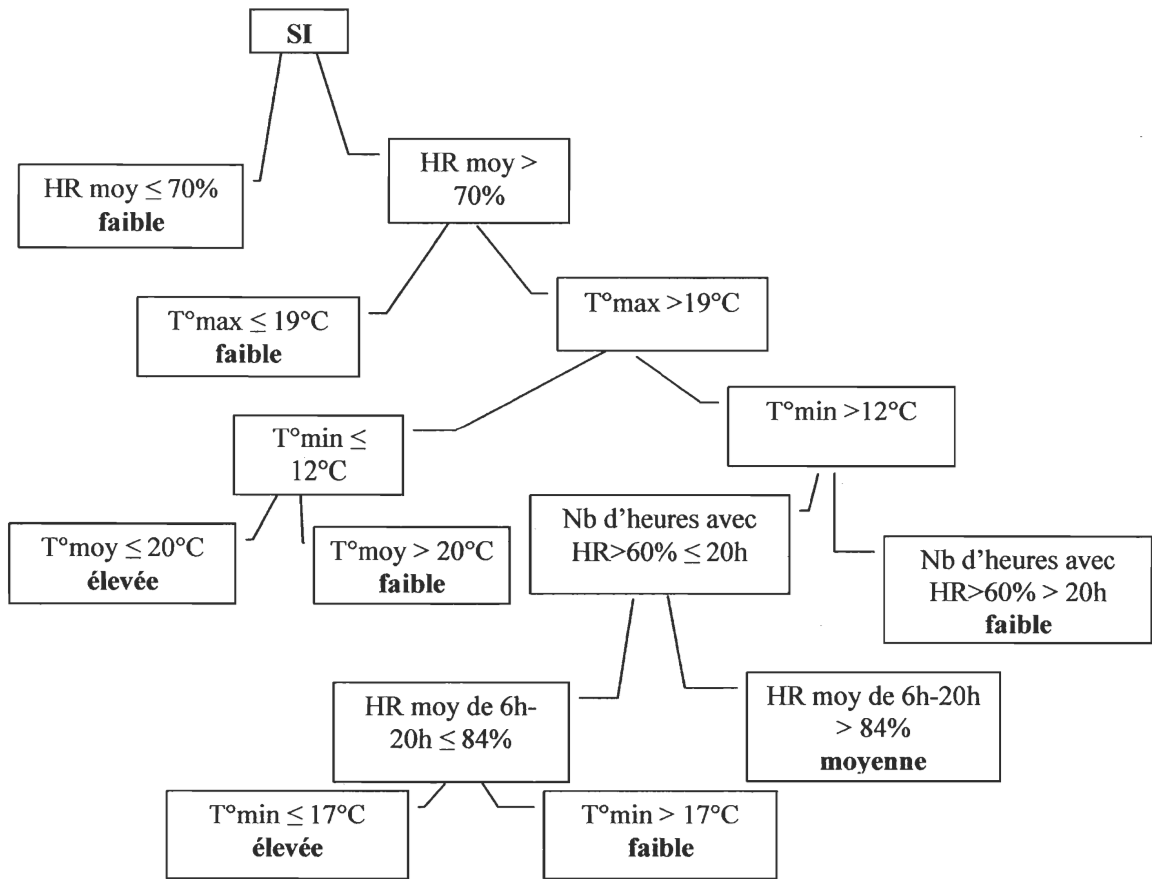


Figure 4.3. Arbre de classification des règles de décision pour la prédiction de risque du blanc chez le fraisier conventionnel ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.

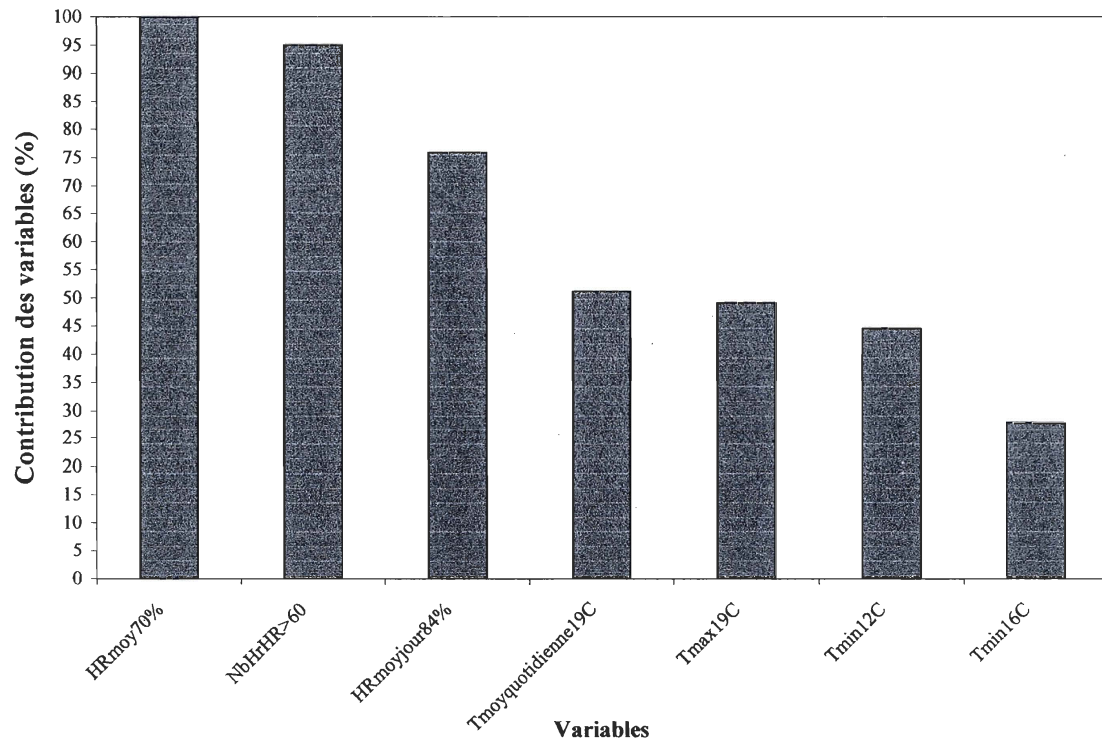


Figure 4.4. Contribution relative (%) des variables météorologiques de l'analyse par arbre de classification pour la prédiction du risque du blanc chez le fraisier conventionnel ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.

Tableau 4.3. Matrice de validation de l'arbre de classification: taux de prédiction des catégories de concentration dans l'air de conidies du blanc de fraisières conventionnels ou à jour neutre, à l'Île d'Orléans, en 2006-2007.

Catégories [conidies]¹	N de cas	Nombre de cas prédits	Taux de prédiction (%)
CAT1	68	48	70,6
CAT2	41	16	39,0
CAT3	39	19	48,7
CAT4	3	0	0

¹Catégories de la concentration de conidies en \log_{10} : CAT1 : $\log[\text{conidies}] \leq 1$; CAT2 : $1 < \log[\text{conidies}] \leq 2$; CAT3 : $2 < \log[\text{conidies}] \leq 3$; CAT4 : $\log[\text{conidies}] > 3$.

4.4 Discussion

L'objectif de cette étude était de prédire la concentration aérienne de conidies de *S. macularis* f. sp. *fragariae* en fraisières conventionnelle ou à jour neutre, à l'aide d'un modèle d'arbre de classification. Le cycle évolutif et les mécanismes de dispersion de l'inoculum anémophile d'un champignon pathogène sont indiscutablement reliés à des facteurs météorologiques, mais l'influence ou la contribution des différents facteurs varie dépendamment des types de champignons pathogènes (Oomycètes et Eumycètes) (Diaz *et al.* 1997). Ainsi, au regard des résultats, il apparaît que l'humidité relative et la température sont deux des principales variables qui font le plus varier la concentration de conidies anémophiles de *S. macularis* f. sp. *fragariae*. Ces résultats concordent donc avec ceux de la littérature (Amsalem *et al.* 2006; Blanco *et al.* 2004; Grove, 1998; Jhooty et McKeen, 1965; Miller *et al.* 2003; Peries, 1962a; Smith et Davies, 1973).

L'humidité relative affecterait directement la dispersion des propagules infectieuses d'une maladie cryptogamique telle que le blanc (rapporté chez la vigne par Diaz *et al.* 1997). De la même façon, dans la présente étude, l'humidité relative moyenne > 70 % est la première variable météorologique servant de règle de décision qui permette de prédire la concentration de conidies du blanc du fraisier dans l'air par l'arbre de classification. La germination des conidies du blanc du fraisier se fait sous des conditions élevées d'humidité relative, soit entre 90 % et 100 % (Jhooty et McKeen, 1965; Peries, 1962a). Ainsi, une humidité relative moyenne > 70 % peut englober ces taux élevés. En plus de l'humidité relative élevée requise pour la germination des conidies, une fluctuation de celle-ci est nécessaire pour la libération des conidies (Blanco *et al.* 2004). Enfin, d'après Amsalem *et al.* (2006), la formation des conidies nécessite des niveaux d'humidité relative se situant entre 70-75 % et 80-85 %, ce qui correspond à un autre facteur associé à la prédiction d'une concentration élevée de conidies anémophiles de *S. macularis* f. sp. *fragariae*, soit une humidité relative moyenne de jour ≤ 84 %.

Par ailleurs, dans notre modèle d'arbre de classification, une humidité relative moyenne > 70 % combinée entre autres à une température moyenne de 20°C prédit aussi une concentration élevée de conidies. L'estimation du taux de germination des conidies faite par Miller *et al.* (2003) chez le blanc du fraisier montre également que la température optimale de germination est près de 20°C, ce qui correspond aussi aux résultats de Jhooty et McKeen (1965) et Peries (1962a). De façon similaire, Amsalem *et al.* (2006) ont montré que la germination des conidies et l'élongation du tube germinatif se produisent de façon optimale à des températures entre 15°C et 25°C. Pour Blanco *et al.* (2004), la concentration de conidies anémophiles serait à son niveau le plus élevé à des températures avoisinant les 15°C.

L'analyse de la concentration de spores anémophiles en fonction des conditions environnementales a déjà été faite chez d'autres cultures que le fraisier. Smith et Davies (1973) ont travaillé sur un modèle empirique pour le blanc de l'orge en fonction des conditions météorologiques et des conidies piégées dans l'air. D'après leur étude, les conditions météorologiques préalablement observées peuvent aider à déterminer l'intensité de la maladie dans la culture. La présence de spores fongiques dans l'air n'est pas un évènement ponctuel. Autrement, les conditions météorologiques du moment pourront influencer le relâchement et la capture ultérieurs des spores (Smith et Davies, 1973). À la différence de la plupart des autres champignons, l'infection par le blanc est plus ou moins continue et ne dépend pas d'une seule condition critique d'infection ; si bien qu'il est difficile de déterminer le temps (durée) requis pour l'infection (Xu, 1999). C'est pourquoi un grand nombre de variables utilisées dans l'analyse par arbre de classification concernaient des données météorologiques des deux ou cinq jours précédents la capture des conidies. Également, de nouvelles variables peuvent être construites sur la base de la biologie du champignon. Par exemple, on sait que la production et le relâchement des conidies de plusieurs espèces de blanc, dont le blanc du fraisier, suivent un patron diurne (Blanco *et al.* 2004; Byrne *et al.* 2000; Grove, 1998). Ainsi, l'ajout de nouvelles variables telles que les moyennes de température ou

d'humidité relative de jour, soit de 6h à 20h, est pertinent pour développer un système prévisionnel. En conséquence, l'inclusion du plus grand nombre possible de variables dans un modèle devrait permettre une meilleure prédiction des épidémies potentielles. En regroupant des données de plusieurs stations ou emplacements d'étude, et de plusieurs saisons, l'arbre de classification peut être validé.

Quelques applications de l'analyse par arbre de classification sont rapportées en épidémiologie végétale. Ainsi, sur la base de caractéristiques physiques et chimiques du sol, un modèle d'arbre de classification a classifié à 93,7% des sols qui présentaient un hyphomycète du sol antagoniste du nématode à kystes du soja (Kim *et al.* 1998). Au moyen de l'analyse par arbre de classification, Kim *et al.* (2002) ont amélioré la précision de modèles d'estimation de la durée d'humectation des feuilles. Kelly et Meentemeyer (2002) ont développé un modèle d'arbre de classification pour estimer avec une efficacité de 58 % le risque de mortalité associée à la maladie de l'encre du chêne rouge. Enfin, sur la base de caractéristiques culturales en pré-semis et de caractéristiques des cultivars, dont la sensibilité à la maladie, un modèle d'arbre de classification a estimé le risque de taches grises du maïs en fin de saison à une précision de 57 à 77 % (Paul et Munkvold, 2004).

À notre connaissance, la présente étude constitue la première application d'un modèle d'arbre de classification à l'estimation de concentrations de conidies anémophiles et à la maladie du blanc. Le taux de prédiction (70,6 %) de la catégorie de concentration de conidies la plus faible (CAT1) se compare aux efficacités des modèles d'arbre de classification des études précitées.

Bien que l'analyse par arbre de classification reste une approche exploratoire, elle permet tout de même d'améliorer les outils disponibles aux producteurs pour la répression du blanc du fraisier. D'autres études sont nécessaires afin d'améliorer ce système prévisionnel en ajoutant plus de variables, telles que la vitesse du vent, la pluviométrie, la durée et l'intensité de la lumière, les radiations solaires, la sensibilité des cultivars utilisés et la phénologie de la plante hôte.

Discussion générale

La relation entre la résistance ontogénique variétale, les conditions environnementales, les systèmes prévisionnels, la concentration de conidies de *S. macularis* f. sp. *fragariae* dans l'air et l'intensité du blanc a été examinée dans le contexte de la production de fraisiers conventionnels ou à jour neutre au champ au Québec. Ce projet a permis d'acquérir une meilleure connaissance du blanc, de valider et d'améliorer un système prévisionnel du blanc du fraisier basé sur son épidémiologie et sur les conditions climatiques du Québec. Les nouvelles connaissances permettront de mieux définir les fenêtres d'application de fongicides, ce qui pourrait permettre de réduire l'utilisation de ceux-ci en diminuant le nombre total d'applications, et par le fait même, les impacts économiques et environnementaux associés à la lutte contre cette maladie.

Les connaissances acquises par cette recherche sur la sensibilité au blanc des cultivars de fraisiers conventionnels et à jour neutre pourront mener à des recommandations aux producteurs de fraises du Québec pour planifier leur plan de la répression de la maladie. Jusqu'à maintenant, peu d'information était disponible à propos de la sensibilité des principaux cultivars utilisés au Québec (Coulombe, 1976). Cette étude constitue donc une première évaluation de la sensibilité variétale au blanc des principaux cultivars de fraisier présentement cultivés au Québec. D'après Fry (1982), les cultivars moins sensibles aux maladies peuvent retarder l'apparition des symptômes, réduire la dispersion de l'agent pathogène et freiner l'épidémie. Les résultats de cette recherche devraient mener au choix rationnel de cultivars de fraisiers moins sensibles au blanc. En plus de permettre une réduction de l'utilisation de fongicides, l'emploi d'un cultivar moins sensible contribuera à réduire le risque de développement de

résistance de *S. macularis* f. sp. *fragariae* aux matières actives homologuées (Nelson *et al.* 1995).

L'aptitude d'un agent pathogène à infecter un hôte peut varier en fonction de l'âge phénologique du tissu attaqué (Ferrandino, 2008). Or, ce phénomène de résistance ontogénique observé chez les feuilles de pommier (Li et Xu, 2002; Ficke *et al.* 2002) et chez la vigne et le raisin (Gadoury et Seem, 1995; Gadoury *et al.* 1997a et b; Gadoury *et al.* 2003; Gee *et al.* 2008; Ficke *et al.* 2002) a aussi été rapporté chez les feuilles de fraisiers face au blanc *S. macularis* (Amsalem *et al.* 2006; Okayama *et al.* 1995, cités par Amsalem *et al.* 2006). Les feuilles de fraisier montrent une forte sensibilité au blanc entre l'émergence de la feuille et l'ouverture complète de la feuille. Les jeunes tissus du fraisier sont beaucoup plus sensibles à l'infection du blanc que les tissus plus âgés (matures) (Amsalem *et al.* 2006, Okayama *et al.* 1995, cités par Amsalem *et al.* 2006). L'étude de l'influence de l'âge des feuilles sur leur sensibilité au blanc a permis d'identifier les périodes à risque pour l'infection des feuilles de fraisier. Ainsi, une recommandation pourrait être faite à l'effet que les applications de fongicides contre le blanc soient effectuées durant les périodes et stades de développement de forte sensibilité des fraisiers, soit beaucoup plus ciblées en début de saison chez les cultivars conventionnels, tels que 'Jewel', et plus réparties tout au long de la période de récolte chez les cultivars à jour neutre, tels que 'Seascape'. Cette recommandation est d'autant plus pertinente si le cultivar est reconnu très sensible au blanc.

Cette étude sur l'épidémiologie du blanc du fraisier montre qu'un système prévisionnel basé uniquement sur la température n'est pas complet, bien que la température demeure un facteur de première importance dans l'épidémiologie du blanc (Blanco *et al.* 2004; Hoffman et Gubler, 2002; Miller *et al.* 2003; Xu, 1999). La quantité d'inoculum (concentration de conidies) dans l'air serait un paramètre à inclure dans le développement d'un système prévisionnel et de répression efficace du blanc du fraisier qui puisse réduire le nombre de

traitements fongicides. Par ailleurs, puisque les conditions météorologiques contribuent à l'augmentation de la concentration de conidies en période de récolte et conséquemment, à l'augmentation de l'incidence du blanc du fraisier (Blanco *et al.* 2004), il est primordial de connaître et comprendre les conditions favorisant le développement du *S. macularis* et du blanc dans le but de gérer efficacement les moyens de lutte.

Ainsi, au regard des résultats de cette recherche et d'après l'analyse par arbre de classification utilisée à des fins exploratoires, il apparaît que l'humidité relative et la température sont deux des principales variables faisant varier la concentration des conidies de *S. macularis* dans l'air (Amsalem *et al.* 2006; Blanco *et al.* 2004; Grove, 1998; Jhooty et McKeen, 1965; Miller *et al.* 2003; Peries, 1962a; Smith et Davies, 1973). Et bien que le meilleur modèle, Gubler-Hoffman avec capteurs de conidies, pourrait améliorer les outils disponibles aux producteurs pour une répression plus efficace du blanc, d'autres études sont nécessaires. L'efficacité du système prévisionnel Gubler-Hoffman avec capteurs de conidies pourrait être améliorée en ajoutant plus de variables, telles que la vitesse du vent, la pluviométrie, la durée et l'intensité de la lumière, les radiations solaires, les cultivars utilisés, la virulence des souches du *S. macularis* f. sp. *fragariae* et la phénologie de la plante hôte. En définitive, l'application des connaissances acquises découlant de cette recherche pourra sans doute, dans un avenir rapproché, permettre l'utilisation de nouveaux moyens de lutte contre le blanc et avoir un impact positif sur la réduction de l'usage de fongicides chez le fraisier.

Conclusions

Le blanc du fraisier, causé par *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae*, est l'une des grandes préoccupations des producteurs de fraises du Québec. Or, jusqu'à maintenant, aucune étude portant sur l'épidémiologie de cette maladie n'avait été faite sous les conditions de culture du Québec, ce qui nuisait à la mise en oeuvre de moyens de lutte efficaces contre le blanc. D'une part, la lutte conventionnelle au blanc du fraisier est basée essentiellement sur la lutte chimique (fongicides) et, dans une moindre mesure, sur la résistance génétique et ontogénique des cultivars, le type de cultivar (conventionnel et à jour neutre), les pratiques culturales (rénovation) et la lutte biologique. D'autre part, l'efficacité mitigée de la lutte chimique contre le blanc peut être expliquée par l'absence ou le manque de synchronisme entre les applications de fongicides et la sensibilité des fruits ou des feuilles à la maladie. La lutte au blanc du fraisier, maladie influencée fortement par la température, l'humidité relative et la pluviométrie, peut être adaptée, voire améliorée, par le développement de systèmes prévisionnels et la prise en compte de la résistance ontogénique, caractéristique d'une lutte raisonnée. L'acquisition de connaissances nouvelles sur la résistance variétale, la résistance ontogénique des feuilles de fraisier, l'épidémiologie de *S. macularis* et les systèmes prévisionnels constitue la pierre angulaire de la lutte raisonnée contre le blanc du fraisier. En somme, cinq des six facteurs énumérés par Scholthof (2007), incluant les trois facteurs initialement proposés par McNew (1960, cité par Scholthof 2007), rejoignent parfaitement les préoccupations du mémoire : l'environnement physique (température, humidité ou pluviométrie), la durée de la période d'infection (le temps), la prévalence (quantité) de l'agent pathogène, l'âge ou la maturité de la plante hôte et sa sensibilité inhérente à la maladie. Le seul des six facteurs à ne pas avoir été pris en compte dans le mémoire est la virulence de l'agent pathogène.

Si force est d'admettre que les pesticides, dont les fongicides, ont largement contribué à l'optimisation des rendements agricoles, de nombreuses questions d'ordre environnemental et socio-économique ont été soulevées par le public et les intervenants du secteur agroalimentaire. Motivée entre autres par des intérêts agro-économiques divers et dans un souci de santé publique, la recherche de stratégies de lutte aux ennemis des cultures basées sur l'utilisation raisonnée des pesticides (fongicides) de synthèse, sur la lutte biologique et le développement de nouvelles technologies comme la transgénèse est devenue un enjeu prioritaire dans notre société. Dans cette optique, l'acquisition des connaissances sur les mécanismes de défense des plantes et sur les principes des nouveaux outils de lutte (systèmes prévisionnels) permettra de mieux harmoniser l'utilisation des pesticides et des technologies destinées à en restreindre l'usage. La lutte chimique continuera probablement à être un moyen de lutte très répandu contre le blanc du fraisier. En revanche, de nouveaux outils ou modèles prévisionnels basés sur les composantes du classique triangle de la maladie ou « *Disease triangle* », soit "*la sensibilité inhérente de la plante hôte, le potentiel d'inoculum de l'agent pathogène, et l'impact de l'environnement sur le parasitisme et la pathogenèse* (McNew, 1960, cité par Scholthof 2007)", pourront contribuer à l'élaboration de programme de lutte en accord avec la protection de l'environnement.

Bibliographie

- Agrios, G. N. 2005. Plant Pathology 5^e édition. Elsevier Academic Press, Burlington, MA. P. 922.
- Alexopoulos, C. J., Mims, C. W., et Blackwell, M. 1996. Introductory mycology, quatrième édition. Wiley and Sons. New York NY. 868 p.
- Amsalem, L., Freeman, S., Rav-David, D., Nitzani, Y., Sztejnberg, A., Pertot, I., et Elad, Y. 2006. Effect of climatic factors on powdery mildew caused by *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae* on strawberry. European Journal of Plant Pathology 114: 283-292.
- Anonyme. 1968. C. M. I. Description of pathogenic fungi and bacteria. *Sphaerotheca macularis*. Mycological Institute. Kew, Surrey. Set 19, no. 188.
- Anonyme. 2005. Profil de la culture de la fraise. Programme de réduction des risques liés aux pesticides. Centre sur la lutte antiparasitaire. Agriculture et Agroalimentaire Canada [en ligne]. Disponible à : http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/prrp/pdf/strawberry_f.pdf
- Anonyme. 2006. Association des producteurs de fraises et de framboises du Québec [en ligne]. Disponible à : <http://www.fraisesetframboisesduquebec.com/php/index.php?sec=1>
- Anonyme. 2008a. Strawberry Production guide for the Northeast, Midwest, and Eastern Canada. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. NRAES. 162 p.
- Anonyme. 2008b. FAOSTAT Database collections [en ligne]. Disponible à : <http://faostat.fao.org/> [cité en janvier 2008].
- Anonyme. 2008c. Agence de réglementation de lutte antiparasitaire [en ligne]. Disponible à : <http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/index-f.html> [cité en janvier 2008].
- Bélangier, R. R., Bushnell, W. R., Dik, A. J., et Carver, T. L. W. (directeurs de la rédaction). 2002. The Powdery Mildews: A Comprehensive Treatise. APS Press, St-Paul MN. 292 p.
- Berger, R. D. 1977. Application of Epidemiological Principles to Achieve Plant Disease Control. Annual Review of Phytopathology 15: 165-181.

- Blanco, C., de los Santos, B., Barrau, C., Arroyo, F. T., Porras, M., et Romero, F. 2004. Relationship among concentrations of *Sphaerotheca macularis* conidia in the air, environmental conditions, and the incidence of powdery mildew in strawberry. *Plant Disease* 88: 878-881.
- Boesewinkel, H. J. 1980. The morphology of the imperfect states of powdery mildews (Erysiphaceae). *The Botanical Review* 46: 167-224.
- Broome, J. C., English, J. T., Marois, J. J., Latorre, B. A., et Aviles, J. C. 1995. Development of an infection model for *Botrytis* bunch rot of grapes based on wetness duration and temperature. *Phytopathology* 85: 97-102.
- Byrne, J. M., Hausbeck, M. K., et Shaw, B. D. 2000. Factors affecting concentrations of airborne conidia of *Oidium* sp. among poinsettias in a greenhouse. *Plant Disease* 84: 1089-1095.
- Campbell, C. L., et Madden, L. V. 1990. Introduction to plant diseases epidemiology. Wiley & Sons, New York NY. 532 p.
- Carisse, O., et Bacon, R. 2004. Le blanc de la vigne. Bulletin d'information no. 10. Réseau d'avertissements phytosanitaires. 7 mai. [en ligne]. Disponible à : <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b10pf04.pdf>
- Carisse, O., et Kushalappa, A. C. 1990. Development of an infection model for *Cercospora carotae* on carrot based on temperature and leaf wetness duration. *Phytopathology* 80: 1233-1238.
- Carisse, O., MacCartney, H. A., Gagnon, J. A., et Brodeur, L. 2005. Quantification of airborne inoculum as an aid in the management of leaf blight of onion caused by *Botrytis squamosa*. *Plant Disease* 89: 726-733.
- Caron, J. 1999. Essai de lutte biologique et chimique contre le blanc du fraisier. Rapport de recherche. Programme sur la recherche appliquée en horticulture.
- Carroll, J. E., et Wilcox, W. F. 2003. Effects of humidity on the development of grapevine powdery mildew. *Phytopathology* 93:1137-1144.
- Celio, G. J., et Hausbeck, M. K. 1997. Evaluation of poinsettia cultivars for susceptibility to powdery mildew. *HortScience* 32: 259-261.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2008. Fraisier Guide de protection 2008. Comité Petits fruits. Québec. <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/VC016.pdf>

- Chellemi, D. O., et Marois, J. J. 1991. Development of a demographic growth model for *Uncinula necator* by using a microcomputer spreadsheet program. *Phytopathology* 81: 250-254.
- Coulombe, L. J. 1976. La répression du blanc du fraisier causé par *Sphaerotheca humili* (DC.) Burr. dans le sud-ouest du Québec. *Phytoprotection* 57: 41-46.
- Couture, L., Brisson, J. D., et Émond, G. (directeurs de la rédaction) 2003. Noms des maladies des plantes au Canada. 4^e édition. Société de protection des plantes du Québec, Québec QC. 340 p.
- Cortesi, P., Gadoury, D. M., Seem, R. C., et Pearson, R. C. 1995. Distribution and retention of cleistothecia of *Uncinula necator* on the bark of grapevines. *Plant Disease* 79:15-19.
- Daubeny, H. A. 1959. Relative resistance of some strawberry varieties, species, selections and seedling populations to powdery mildew at Agassiz and Abbotsford, British Columbia. *Plant Disease Reporter* 43: 1253-1255.
- Daubeny, H. A. 1961. Powdery mildew resistance in strawberry progenies. *Canadian Journal of Plant Science* 41: 239-243.
- Davik, J., et Honne, B. J. 2005. Genetic variance and breeding values for resistance to a wind-borne disease [*Sphaerotheca macularis* (Wallr. ex. Fr.)] in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) estimated by exploring mixed and spatial models and pedigree information. *Theoretical and Applied Genetics* 111: 256-264.
- Develey-Rivière, M.-P., et Galiana, E. 2007. Resistance to pathogens and host developmental stage: a multifaceted relationship within the plant kingdom. *New Phytologist* 175: 405-416. (Synthèse)
- Diaz, M. R., Iglesias, I., et Jato, M. V. 1997. Airborne concentrations of *Botrytis*, *Uncinula* et *Plasmopara* spores in vineyard in Leiro-Ourense (N. W. Spain). *Aerobiologia* 13: 31-35.
- Doster, M. A., et Schnathorst, W. C. 1985. Effects of leaf maturity and cultivar resistance on development of the powdery mildew fungus on grapevines. *Phytopathology* 75: 318-321.
- Ferrandino, F. J. 2008. Effect of crop growth and canopy filtration on the dynamics of plant disease epidemics spread by aerially dispersed spores. *Phytopathology* 98:492-503.
- Ficke, A., Gadoury, D. M., et Seem, R. C. 2002. Ontogenic resistance and plant disease management: a case study of grape powdery mildew. *Phytopathology* 92: 671-675.

- Ficke, A., Gadoury, D. M., Seem, R. C., et Dry, I. B. 2003. Effects of ontogenic resistance upon establishment and growth of *Uncinula necator* on grape berries. *Phytopathology* 93: 556-563.
- Ficke, A., Gadoury, D. M., Seem, R. C., Godfrey, D., et Dry, I. B. 2004. Host barriers and responses to *Uncinula necator* in developing grape berries. *Phytopathology* 94: 438-445.
- Fry, W. E. 1982. Principles of plant disease management. Academic Press, New York NY. 378 p.
- Gadoury, D. M., et Seem, R. C. 1995. Development of ontogenic resistance to powdery mildew (*Uncinula necator*) in fruit of Concord grapevines. *Phytopathology* 85: 1149. (Résumé).
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., Magarey, P. A., Emmett, R., et Magarey, R. 1997a. Effects of environment and fungicides on epidemics of grape powdery mildew: considerations for practical model development and disease management. *Viticultural and Enologic Science* 52: 225-229.
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., et Wilcox, W. F. 1997b. Early ontogenic resistance to powdery mildew in Chardonnay and Riesling grapes. *Phytopathology* 87 (suppl.): S31. (Résumé).
- Gadoury, D. M., Seem, R. C., Ficke, A., et Wilcox, W. F. 2003. Ontogenic resistance to powdery mildew in grape berries. *Phytopathology* 93: 547-555.
- Gee, C. T., Gadoury, D. M., et Cadle-Davidson, L. 2008. Ontogenic resistance to *Uncinula necator* varies by genotype and tissue type in a diverse collection of *Vitis* spp. *Plant Disease* 92:1067-1073.
- Gourley, C. O. 1979. Cleistothecia of *Sphaerotheca macularis* on strawberry leaves in Nova Scotia. *Canadian Plant Disease Survey* 59: 80. Grove, G. G. 1998. Meteorological factors affecting airborne conidia concentrations and the latent period of *Podosphaera clandestina* on sweet cherry. *Plant Disease* 82: 741-746.
- Gubler, W. D., Rademacher, M. R., Vasquez, S. J., et Thomas, C. S. 1999. Control of Powdery Mildew using the UC Davis Powdery Mildew Risk Index. APSnet Feature January 6 - 31, 1999. [en ligne] Disponible à: www.apsnet.org/online/feature/pmildew/
- Gugino, B. K., Carroll, J. E., Widmer, P., Chen, P., et Abawi, G. S. 2007. Field evaluation of carrot cultivars for susceptibility to fungal leaf blight diseases in New York. *Crop Protection* 26: 709-714.

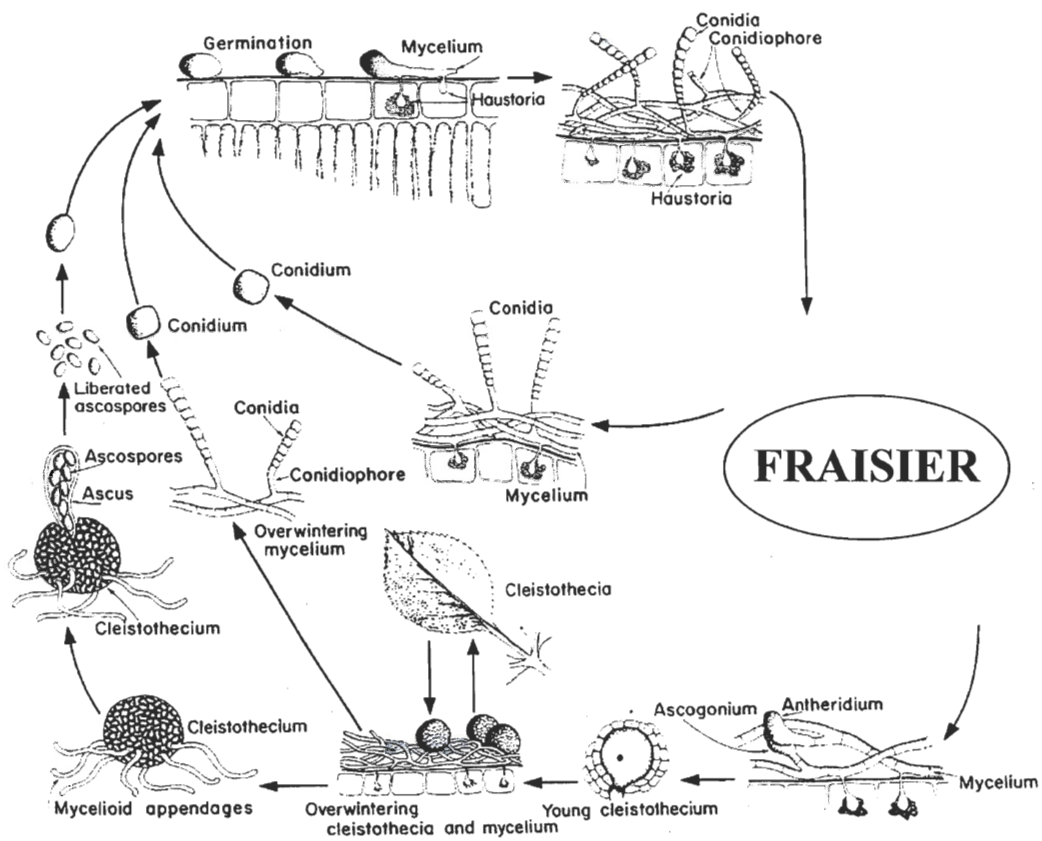
- Hoffman, L. E., et Gubler, W. D. 2002. Validation of the UC Davis Strawberry Powdery Mildew Risk Index. California Strawberry Commission. [en ligne]. Disponible à : http://63.200.116.229:10080/Research/02-19_gubler_pm_%202002.pdf
- Hsu, C. S., Watkins, R., Bolton, A. T., et Spangelo, L. P. S. 1969. Inheritance of resistance to powdery mildew in the cultivated strawberry. *Canadian Journal of Genetics and Cytology* 11: 426-438.
- Jacob, D., David, D. R., Sztjenberg, A. et Elad, Y. 2008. Conditions for Development of Powdery Mildew of Tomato Caused by *Oidium neolycopersici*. *Phytopathology* 98 : 270-281.
- Jarvis, W. R., Gubler, W. G., et Grove, G. G. 2002. Epidemiology of powdery mildews in agricultural pathosystems. Dans R. R. Bélanger, W. R. Bushnell, A. J. Dik et T. L. W. Carver (directeurs de la rédaction), *The Powdery Mildews: A Comprehensive Treatise*. American Phytopathological Society, St. Paul MN, pp. 169–199.
- Jeger, M. J. 1984. Relating disease progress to cumulative numbers of trapped spores: apple powdery mildew and scab epidemics in sprayed and unsprayed orchard plots. *Plant Pathology* 33: 517-523.
- Jhooty, J. S., et McKeen, W. E. 1962. The perfect stage of *Sphaerotheca macularis* on strawberry plants. *Plant Disease Reporter* 46 (4): 218-219.
- Jhooty, J. S., et McKeen, W. E. 1965. Studies on powdery mildew of strawberry caused by *Sphaerotheca macularis*. *Phytopathology* 55: 281-285.
- Khanizadeh, S., et DeEll, J. 2005. *Our Strawberries/Les fraisières de chez nous*. Canada: PWGSC, Publishing and Depository Services, Ottawa, ON, 551 pages.
- Kelly, M., et Meentemeyer, R. K. 2002. Landscape dynamics of the spread of sudden oak death. 2002. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68, pp. 1001–1009.
- Kim, D. G., Riggs, R. D., et Correll, J. C. 1998. Isolation, characterization, and distribution of a biocontrol fungus from cysts of *Heterodera glycines*. *Phytopathology* 88:465-471.
- Kim, D. G., Taylor, S. E., Gleason, M. L., et Koehler, K. J. 2002. Model to enhance site-specific estimation of leaf wetness duration. *Plant Disease* 86: 179-185.
- Lacey, J. 1996. Spore dispersal – its role in ecology and disease : the British contribution to fungal aerobiology. *Mycological Research* 100: 641-660.

- Lacroix, M. 2005. Le blanc du fraisier. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection du Québec, MAPAQ. Québec QC. p. 9. Disponible à <http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Blanc%20fraisier%20E.pdf> [cité le 26 juin 2008].
- Li, B., et Xu, X. 2002. Infection and development of apple scab (*Venturia inaequalis*) on old leaves. *Journal of Phytopathology* 150: 687-691.
- Maas, J. L. 1998. Compendium of strawberry diseases. 2e édition. The American Phytopathological Society Press. St Paul, MN. 138 p.
- MacLachlan, J. B. 1978. Data on the inheritance of resistance to powdery mildew in the cultivated strawberry. *Scientia Horticulturae* 8: 43-49.
- Miller, T. C., Gubler, W. D., Geng, S., et Rizzo, D. M. 2003. Effects of temperature and water vapor pressure on conidial germination and lesion expansion of *Sphaerotheca macularis* f. sp. *fragariae*. *Plant Disease* 87: 484-492.
- Miller, P. W., et Waldo, G. F. 1957. Relative resistance of some strawberry varieties and selections to powdery mildew at Corvallis, OR. *Plant Disease Reporter* 41: 23-24.
- Nelson, M. D., Gubler, W. D., et Shaw, D. V. 1995. Inheritance of powdery mildew resistance in greenhouse-grown versus field-grown California strawberry progenies. *Phytopathology* 85: 421-424.
- Nelson, M. D., Gubler, W. D., et Shaw, D. V. 1996. Relative resistance of 47 strawberry cultivars to powdery mildew in California greenhouse and field environments. *Plant Disease* 80: 326-328.
- Nita, M., Ellis, M. A., et Madden, L. V. 2003. Effects of temperature, wetness duration, and leaflet age on infection of strawberry foliage by *Phomopsis obscurans*. *Plant Disease* 87:579-584.
- Orchard, W. R., et van Adrichem, M. C. J. 1957. Relative resistance of some strawberry species, varieties and selections to powdery mildew at Saanichton, British Columbia. *Plant Disease Reporter* 41: 945-947.
- Paul, P. A., et Munkvold, G. P. 2004. A model-based approach to preplanting risk assessment for gray leaf spot of maize. *Phytopathology* 94:1350-1357.
- Peries, O. S. 1962a. Studies on strawberry mildew, caused by *Sphaerotheca macularis* (Wallr. ex. Fries) Jaczewski*. I. Biology of the fungus. *Annals of Applied Biology* 50: 211-224.

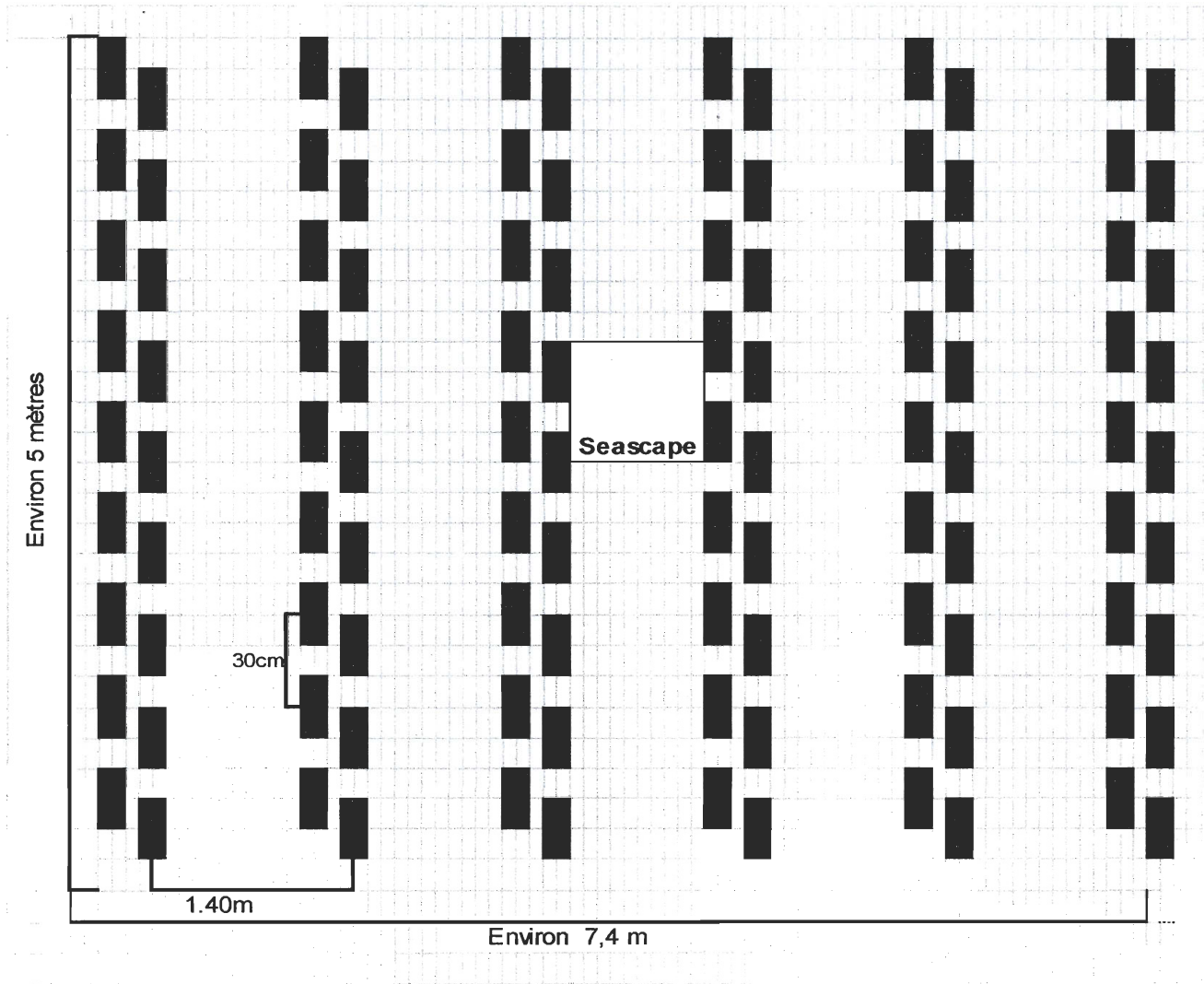
- Peries, O. S. 1962b. Studies on strawberry mildew, caused by *Sphaerotheca macularis* (Wallr. Ex. Fries) Jaczewski*. II. Host-parasite relationships on foliage of strawberry varieties. *Annals of Applied Biology* 50: 225-233.
- Populer, C. 1978. Changes in host susceptibility with time. Pages 239- 261 in: *Plant Pathology: An Advanced Treatise*. J. G. Horsfall et E. C. Cowling (directeurs de la rédaction). eds. Academic Press, New York NY.
- Richard, C., et Boivin, G. (directeurs de la rédaction). 1994. *Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada*. Société Canadienne de Phytopathologie et Société Canadienne Entomologie, Ottawa ON. 590 p.
- Rügner, A., Rumbolz, J., Huber, B., Bleyer, G., Gisi, U., Kassemeyer, H.-H., et Guggenheim, R. 2002. Formation of overwintering structures of *Uncinula necator* and colonization of grapevine under field conditions. *Plant Pathology* 51: 322-330.
- Sall, M. A. 1980. Epidemiology of grape powdery mildew: A model. *Phytopathology* 70: 338-342.
- Schoeman, M. H., Manicom, B. Q., et Wingfield M. J. 1995. Epidemiology of powdery mildew on mango blossoms. *Plant Disease* 79: 524-528.
- Scholthof, K. B. G. 2007. The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews: Microbiology* 5: 152-156.
- Shaner, G., et Finney, R. E. 1977. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. *Phytopathology* 67:1051-1056.
- Sherrod, P. H. 2003. DTREG – Classification and regression trees for data mining and modelling. [en ligne] Disponible à: <http://www.dtreg.com/>
- Simpson, D. W. 1987. The inheritance of mildew resistance in everbearing and day-neutral strawberry seedling. *Journal of Horticultural Science* 62: 329-334.
- Smith, L. P., et Davies, R. R. 1973. Weather conditions and spore trap catches of barley mildew. *Plant Pathology* 22: 1-10.
- Urbain, L. 2006. Tache angulaire dans la fraise. Avertissement Petits fruits No 12 (14 juin 2006). Réseau d'avertissements phytosanitaires du MAPAQ. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Québec.
- Urbain, L. 2007. Fraisiers : Rénovation (rajeunissement). Bulletin d'information No 10 (10 juillet 2007). Réseau d'avertissements phytosanitaires du MAPAQ. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Québec.

- Urbain, L. 2008. Stratégie d'intervention contre le blanc du fraisier. Réseau d'avertissements phytosanitaires. MAPAQ. Bulletin d'information # 6 - Petits fruits. 22 mai 2008. Québec QC. p. 4. Disponible à <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b09pf06.pdf> [cité le 26 juin 2008].
- Viret, O., Ancay, A., et Terrettaz, C. 1998. Oïdium du fraisier [*Sphaerotheca aphanis* (Wallr.) U.Braun]: incidence des traitements d'automne sur la production et la qualité sanitaire des fruits. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture* 30: 265-269.
- Xiao, C. L., Chandler, C. K., Price, J. F., Duval, J. R., Mertely, J. C., et Legard, D. E. 2001. Comparison of Epidemics of Botrytis Fruit Rot and Powdery Mildew of Strawberry in Large Plastic Tunnel and Field Production Systems. *Plant Disease* 85: 901-909.
- Xu, X.-M. 1999. Effects of temperature on the length of the incubation period of rose powdery mildew (*Sphaerotheca pannosa* var. *rosae*). *European Journal of Plant Pathology* 105: 13-21.
- Yarwood, C.E. 1959. Predisposition. *Dans* J. G. Horsfall et A. E. Dimond (directeurs de la rédaction). *Plant Pathology*. Vol. 1. Academic Press, New York NY, p. 521-562.

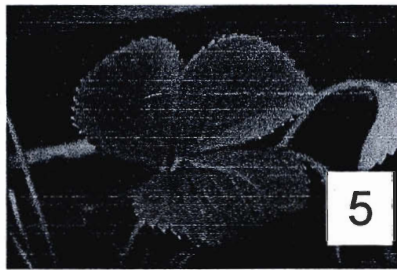
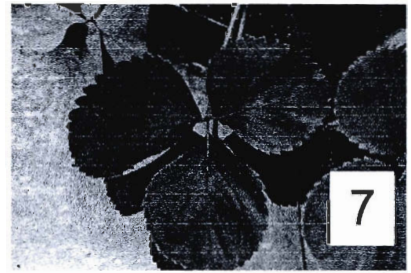
Annexes



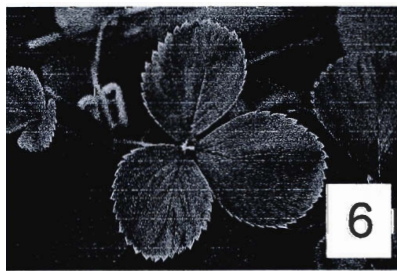
A.1 Cycle évolutif du blanc du fraisier *Sphaerotheca macularis*. Adapté de Agrios, 2005.



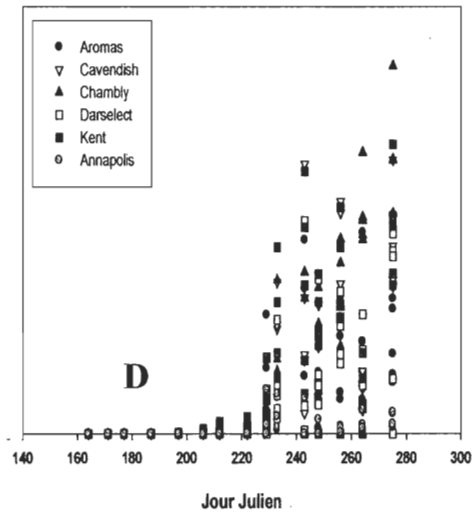
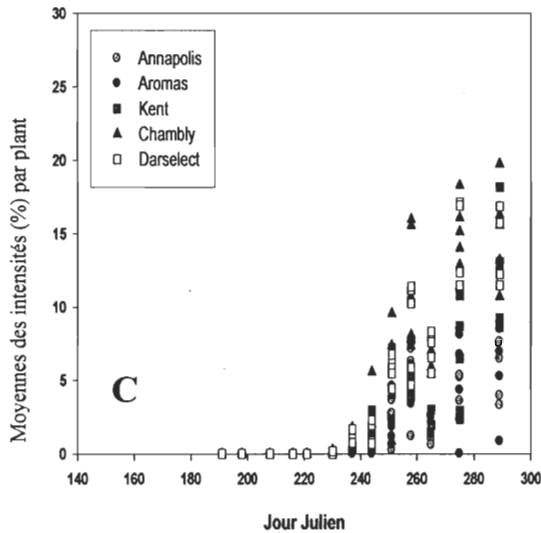
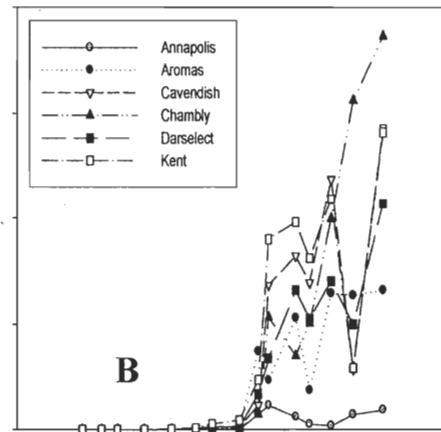
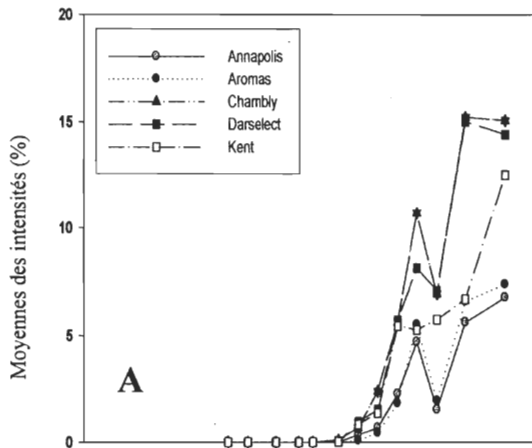
A.2. Plan de champ de la ferme expérimentale de Frelighsburg 2007 pour l'essai sur l'influence des cultivars sur le développement du blanc.



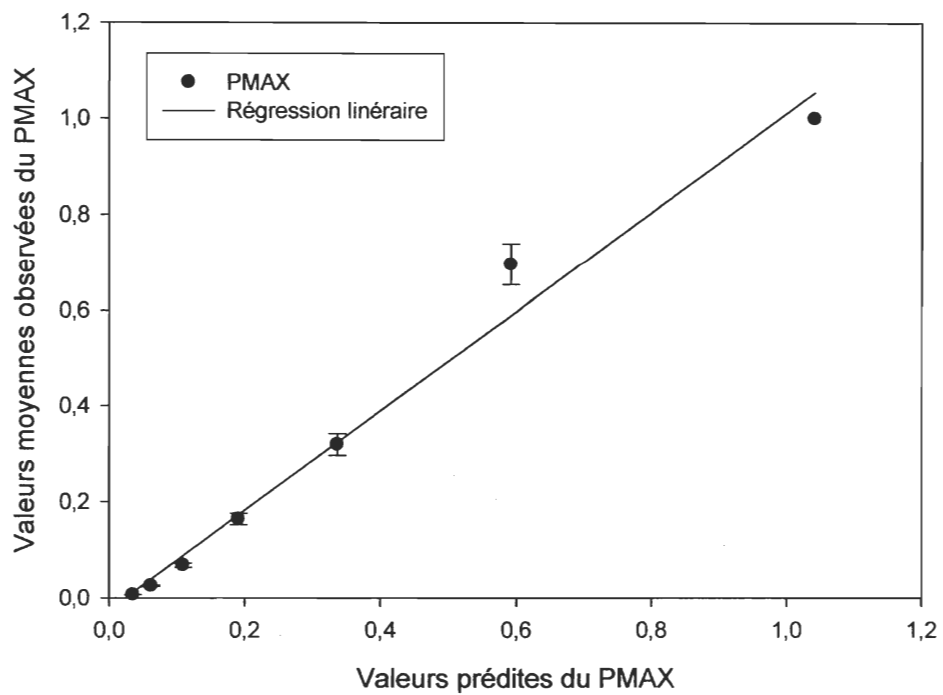
Stade 1 : Émergée mais repliée
Stade 2 : Partiellement dépliée
Stade 3 : Pleinement dépliée
Stade 4 : Ouverte
Stade 5 : Ouverte verte pâle
Stade 6 : Pleinement ouverte
Stade 7 : Mature



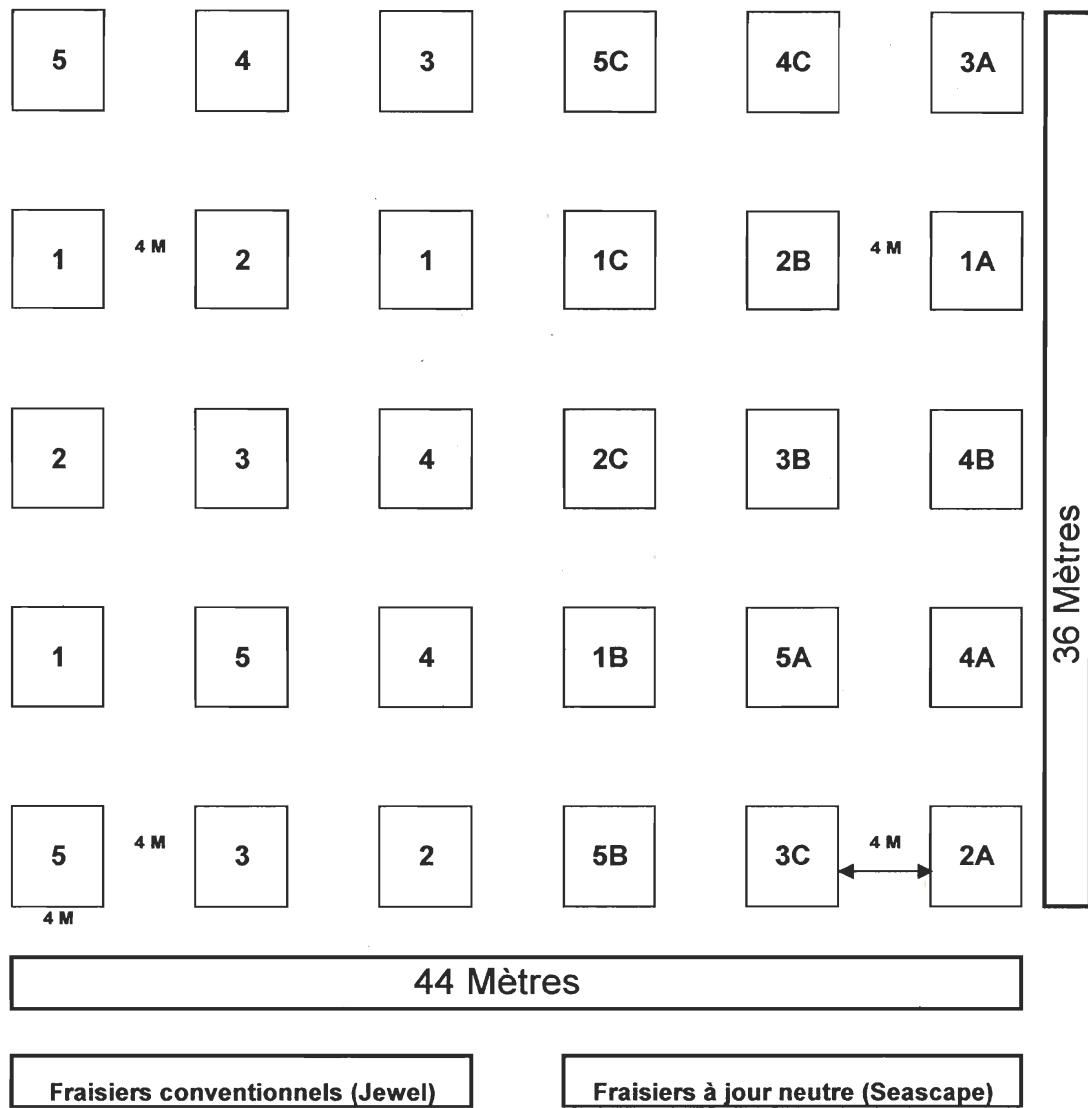
A.3 Différents stades phénologiques d'un plant de fraisier pour l'évaluation de l'influence de l'âge des feuilles sur le développement du blanc.



A.4 Moyennes des intensités (%) de blanc de chacun des cultivars en fonction des jours juliens en 2006 (L'Acadie) (A) et 2007 (Frelighsburg) (B), et moyennes des intensités de blanc exprimées en pourcentage de cinq plants pour l'ensemble des cultivars en fonction des jours juliens pour 2006 (L'Acadie) (C) et 2007 (Frelighsburg) (D).



A.5 Régression linéaire des valeurs moyennes observées de la proportion du maximum (Pmax) en fonction des valeurs prédites par le modèle et issues de la combinaison des cultivars 'Jewel' et 'Seascape' pour l'année 2007.



A.6 Plan de champ des fermes expérimentales de l'Acadie et de Frelighsburg en 2006 et 2007 pour l'essai des systèmes prévisionnels.