

**DISTRIBUTION DE LA PÉRIODE D'INFECTION DES ASCOSPORES DE
*VENTURIA INAEQUALIS***

IRDA-1-14-1711

DURÉE DU PROJET : MARS 2015 / FÉVRIER 2018

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Vincent Philion, IRDA

18 février 2018

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

**TITRE DU PROJET :
DISTRIBUTION DE LA PÉRIODE D'INFECTION DES ASCOSPORES DE *VENTURIA INAEQUALIS***

**NUMÉRO DU PROJET :
IRDA-1-14-1711**

RÉSUMÉ DU PROJET (Maximum 20 lignes)

À chaque printemps, les producteurs de pommes interviennent pour réprimer la tavelure lors des infections primaires causées par le champignon *Venturia inaequalis*. Les critères d'infection établis en 1944 (Mills) ont fait l'objet de nombreuses révisions qui ont généré des critères d'infection minimale qui sont très conservateurs et qui entraînent plus d'interventions phytosanitaires que nécessaires par rapport au risque réel encouru. Le décalage entre les courbes d'infection minimale et le risque est dû en partie à la distribution de la vitesse d'infection des ascospores. La vitesse d'infection de la spore la plus rapide sert actuellement de critère d'intervention alors que le risque progresse graduellement à mesure que la portion des spores qui infecte augmente. L'objectif de notre projet était d'établir la distribution de la vitesse d'infection selon la température et de mieux comprendre l'effet des périodes de séchage sur la survie des spores. Nous avons observé que la vitesse des ascospores est peu étalée. Une fois que les critères d'infection sont rencontrés, la progression de l'infection est relativement rapide. La progression graduelle du risque observée pendant l'infection est donc plus en lien avec l'étalement dans l'éjection des spores que l'étalement dans la vitesse d'infection. Il est également possible que les fongicides de contact agissent partiellement après l'infection des spores. Une fois les spores parvenues sur le feuillage, leur survie en cas de séchage dépend du temps écoulé depuis leur arrivée et de l'intensité de l'exposition au soleil. Nos résultats tendent à démontrer que les courtes averses suivies d'une période sèche diminuent la sévérité de la tavelure alors que les pluies d'une durée proche du temps minimal d'infection sont plus à risque quand le feuillage est mouillé à nouveau dans les jours suivants la première pluie.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Pour établir la distribution de la vitesse d'infection, soit la différence entre les spores les plus rapides et les plus lentes de la population, nous avons inoculé des pommiers en pots avec des ascospores et observé la proportion capable d'infecter après différentes durées et température d'infection. Pour estimer l'effet des périodes sèches sur la survie des ascospores, nous avons fait varier la période d'infection avant de sécher les arbres et inversement fait varier la période de séchage après une période d'infection standardisée.

L'inoculation en laboratoire de pommiers avec des ascospores de *Venturia inaequalis* n'est pas une pratique courante. La production des spores a été réalisée à partir d'une méthode développée à l'IRDA (voir rapport http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/1590_Rapport.pdf), et les essais de 2015 ont permis d'uniformiser les infections sur pommiers en pots et s'assurer de la reproductibilité des résultats. Pour toutes les expériences, nous avons inoculé 50 µl par feuille (0.5 ascospore par µl) à l'aide d'un aérographe (airbrush) sur les 3 feuilles les plus jeunes des pousses en croissance de 4 pommiers pour chaque traitement. Selon l'expérience, l'étape d'infection était faite à température fixe, mais différente selon l'essai et la durée de la période d'humectation était variable. Dans tous les cas, les symptômes ont été dénombrés après 26-28 jours d'incubation dans des conditions contrôlées, identiques pour tous les arbres. Pour le volet sur la distribution de la période d'infection des ascospores, nous avons testé une gamme de températures et de périodes d'infection. Pour le volet sur la survie des ascospores, nous avons testé deux approches. Dans la première, nous avons exposé des arbres inoculés à des durées variables de mouillure à 18°C avant d'être exposés à l'extérieur pendant 24h (voir schéma en annexe). Cette expérience a été réalisée 2 fois. Dans la deuxième, nous avons fixé à 3h la durée de mouillure initiale à 18°C et ensuite fait varier la période sèche à l'extérieur de 0 à 48h. Cette

expérience a été réalisée 3 fois. Après exposition les arbres ont été retournés dans la chambre d'infection pour 48h à 18°C pour permettre l'infection de toutes les spores ayant survécu à l'exposition extérieure.

Le projet initial prévoyait également un volet sur la survie hivernale des taches suite à un traitement fongicide. Nous voulions vérifier l'hypothèse que l'effet fongistatique des fongicides systémiques n'inhibait pas la production des ascospores au cours de l'hiver suivant les traitements (cheval de Troie). Brièvement, des pommiers ont été inoculés et ensuite infectés pendant 24h avant d'être traités avec différents produits (Scala, Inspire Super, bicarbonate de potassium). Après incubation, les pommiers ont été exposés à l'extérieur jusqu'à l'automne. Les feuilles ont ensuite été récoltées et soumises à un hiver artificiel pour établir leur potentiel à produire des ascospores en comparaison à un témoin non traité. Les résultats de la première année du projet (2015) ne semblaient pas confirmer de survie préférentielle selon les fongicides. Les résultats de 2016 n'étaient pas concluants parce que la productivité des spores dans le témoin était faible. Conséquemment, nous avons abandonné ce volet et les expériences n'ont pas été réalisées en 2017.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Volet Distribution des infections : Les résultats obtenus à différentes températures confirment que l'infection des spores n'est pas simultanée et que la vitesse varie au sein de la population de spores. Cependant, la différence de vitesse entre les spores les plus lentes et les plus rapides progresse différemment que celle actuellement intégrée dans les modèles. Par exemple à 14°C la différence entre la durée minimale d'infection (6.1 heures) et le moment où la moitié des taches potentielles était visible (9.4 heures), n'est que 3.3 heures (Annexe, Figure 1). Pour les premières spores éjectées, le risque progresse donc plus rapidement avec l'augmentation de la durée d'humectation que les modèles le prévoit. L'inverse s'observe pour le temps d'infection des dernières spores qui prennent plus de temps à infecter. Même si la vitesse moyenne correspond à celle prédite, nos données diffèrent des prévisions utilisées. En conséquence, les modifications à RIMpro pour la vitesse moyenne seront minimales, mais la forme de la courbe sera changée. Comme la vitesse d'infection moyenne est déjà correctement modélisée, il est possible que l'éjection plus étalée ou une activité post-infection partielle des fongicides de contact expliquent un bon contrôle de la tavelure observé malgré des interventions tardives en cours d'infection. Néanmoins, la base des calculs sera certainement plus fiable. Par ailleurs, le nombre minimal d'heures requis à chaque température pour l'infection calculé dans le cadre du projet était systématiquement plus petit que ceux publiés dans la littérature (Annexe, Figure 2). Les différences les plus grandes ont été observées à 4°C (24 h vs 28h). Ce résultat était attendu puisque le temps d'éjection qui normalement contribue au temps d'infection était remplacé à dessein dans notre étude par une inoculation simultanée des spores. Le temps d'infection pour provoquer 50% des lésions suivait de près la courbe de risque « léger » de Mills alors que le temps d'infection pour 95% des spores dépassait la courbe de risque « modéré ». Finalement, le projet a permis d'établir une courbe non-linéaire de réponse à la température, soit la vitesse de l'infection selon la température. Jusqu'à tout récemment, l'infection était calculée avec une approximation linéaire (degrés-heures). Cette courbe a été utilisée pour regrouper tous les résultats (Figure 1).

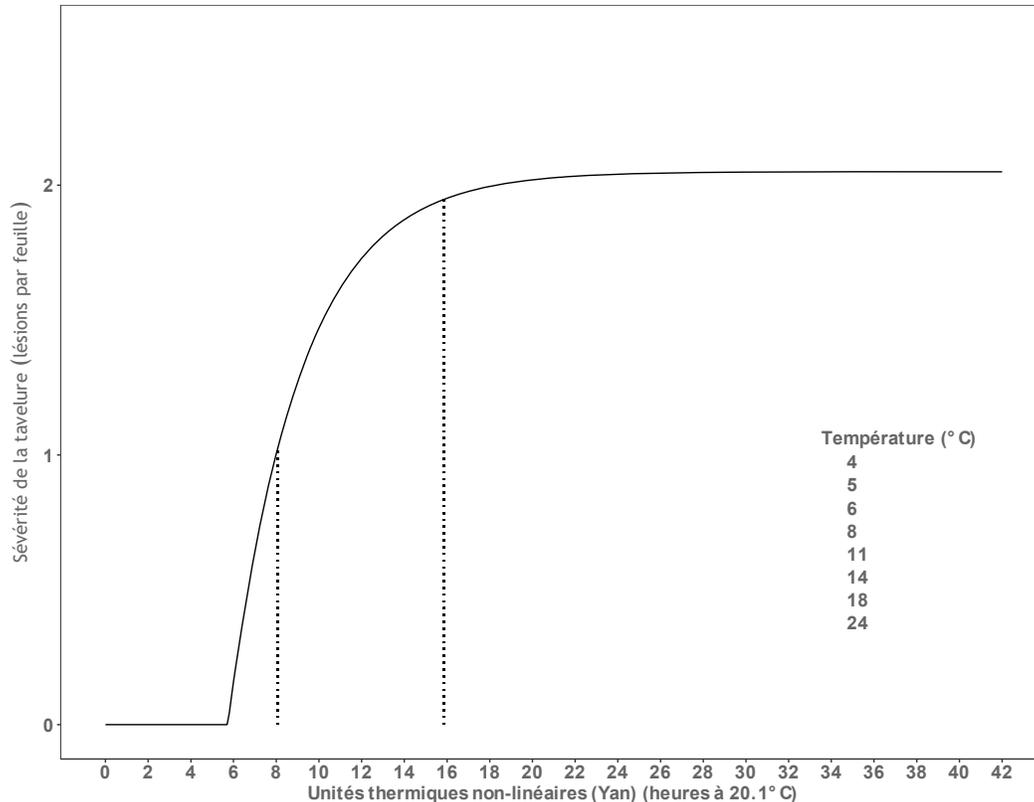


Figure 1. Progression du risque de la tavelure en fonction des unités thermiques (UT) selon Yan accumulées pendant la période d'humectation. La relation a été modélisée avec une fonction monomoléculaire avec décalage horizontal : $Y = a \cdot (1 - \exp(-k \cdot (UT - t.x)))$. Le nombre maximal de taches correspond à l'asymptote horizontale (a). Le taux de progression (k) = 0.296. Les unités thermiques (UT) sont obtenues en multipliant la durée d'humectation par la vitesse relative des spores à cette température. La vitesse relative est calculée par rapport à la vitesse observée à 20.1 °C. La progression est nulle aux températures inférieures à 0 °C et supérieures à 34.9 °C. $UT = \text{Durée} \cdot ((34.9 - T) / (34.9 - 20.1)) \cdot (T / 20.1)^{(20.1 / (34.9 - 20.1))}$ où T = température durant l'infection. Les unités thermiques requises pour une infection minimale (t.x = 5.7 UT), pour atteindre 50% (8.1 UT) et 95% (15.9 UT) des taches a été obtenu par régression non linéaire. Les expériences à 6, 18 et 24 °C ont été réalisées 2 fois. Le graphique a été tronqué à 42 unités thermiques pour mettre l'accent sur les valeurs inférieures de la courbe.

Volet survie des ascospores en conditions sèches :

Tel qu'anticipé, la durée de la période de mouillure précédant l'exposition extérieure au sec testée dans l'approche 1, a eu une influence majeure sur la sévérité de l'infection des arbres. Plus la période d'humectation précédant l'exposition au sec est longue, plus la survie subséquente est importante. Les résultats détaillés sont annexés au rapport.

Pour la deuxième approche, nous avons observé une chute du nombre de tache proportionnelle à la durée d'exposition à des conditions sèches. Après 48h d'exposition extérieure, la sévérité des taches avait diminué de 95%. Nous avons comparé des modèles de survie avec différentes variables (heures d'exposition, température maximale, etc) et des variables dérivées (ex : degrés-heures) afin de prédire la mortalité. La radiation solaire mesurée pendant la période sèche était le meilleur indicateur de survie. Ces résultats corroborent des expériences réalisées antérieurement avec différentes méthodologies.

Selon notre modèle, environ 28% des spores sont toujours en vie après 24 heures de séchage [21-38%]. Concrètement, ces résultats signifient que contrairement aux règles en cours, une période de séchage de

24h ne suffit pas pour tuer les spores. Qui plus est, dès que le critère minimum d'infection est atteint lors de la première mouillure, une forte proportion des spores peut survivre et infecter l'arbre à condition que la pluie qui suit la période sèche de 24h soit assez longue. Pour aider à la prise de décision, le simulateur RIMpro reflétera visuellement la survie prolongée des spores. Dans les cas où la survie des spores pourrait conduire à une infection inattendue, des traitements ciblés pourront être recommandés.

En combinant les résultats des volets sur la distribution et la survie des spores, nous proposons un premier modèle conservateur qui prédit la sévérité des infections après un temps d'humectation initiale, une période sèche et finalement des conditions optimales d'humectation pour compléter l'infection. Ce modèle n'a pas été validé avec des données indépendantes dans le cadre de notre projet mais pourrait néanmoins être utile puisque des règles empiriques sont utilisées de facto. Le modèle est représenté par la figure 2.

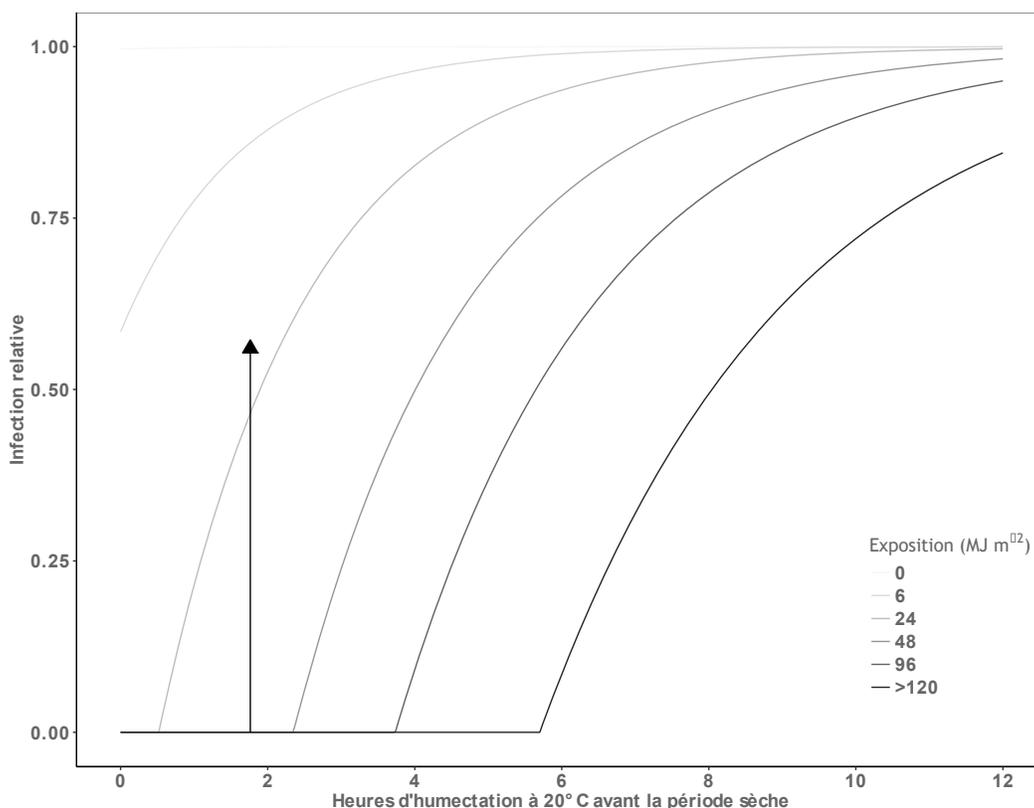


Figure 2. Prévision du risque de la tavelure lorsque l'infection est interrompue par une période sèche. Les heures d'humectations peuvent être calculées avec les unités thermiques de Yan (UT) lorsque la température est plus basse. La période sèche (MJ m⁻²) correspond approximativement à la durée de séchage en heures. Par exemple, l'infection relative approximative des spores éjectées pendant une pluie de 3 heures à 9°C (soit 1.8 UT) interrompues par une période sèche de 21 heures (environ 21 MJ m⁻²) avant une nouvelle pluie assez longue pour favoriser l'infection serait de 0.57x (flèche).

DIFFUSION DES RÉSULTATS

À l'exception d'une présentation aux journées « Agropomme » qui a été substituée par une présentation sur le feu bactérien, le plan de diffusion correspond à celui prévu dans l'appel de projet. Les résultats ont été présentés à la réunion annuelle du comité des maladies du pommier en 2016 et 2017. Ce comité issu du groupe d'experts en protection des pommiers réunit les conseillers pomicoles publics et privés. Les résultats ont également été présentés aux journées de la recherche en pomiculture (JARIT) organisées par l'IRDA en février 2018. Par ailleurs, les fiches du guide PFI et les avertissements seront modifiées pour refléter les

nouveaux résultats. Les modèles développés dans le cadre de ce projet sont en cours d'intégration dans le logiciel RIMpro et la plupart des éléments seront disponibles pour la saison 2018. Contrairement à nos prévisions, par manque de temps le modèle de survie ne sera entièrement intégré que pour la saison 2019. Les modifications à RIMpro seront faites à l'automne 2018.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Mieux cibler les interventions phytosanitaires est un élément clef de la gestion intégrée des ennemis des cultures. L'amélioration continue des modèles de prévision des ravageurs permet d'atteindre cet objectif en diminuant l'incertitude quant à la justesse des recommandations faites aux producteurs. Il est possible que ces améliorations mènent à plus d'interventions dans des moments clefs, mais aussi à moins d'interventions quand le risque est plus faible. Ce projet spécifique a été réalisé dans le but d'améliorer les recommandations pendant la période des infections primaires et s'inscrit dans un programme de recherche qui vise à identifier les lacunes dans nos connaissances et combler ces lacunes. Les connaissances acquises sur la dynamique des infections et l'impact des périodes sèches sur le risque de la tavelure se traduiront par des indices de risque plus précis et donc des interventions mieux ciblées. Les résultats de projets connexes (en cours) sur l'efficacité des produits fongicides en post-infection, sur l'effet du lessivage des traitements par la pluie et l'impact de la sortie des nouvelles feuilles sur l'efficacité des traitements viendront bonifier les résultats présentés ici.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Vincent Philion, agr., M.Sc.
Institut de recherche et de développement en agro-environnement
335, Rang des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville (Québec) J3V 0G7
vincent.philion@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été réalisé dans le cadre du volet 4 du programme Prime-Vert – Appui au développement et au transfert de connaissances en agroenvironnement avec une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation par l'entremise de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021.

Annexe : Résultats détaillés des essais.

Volet Distribution des infections :

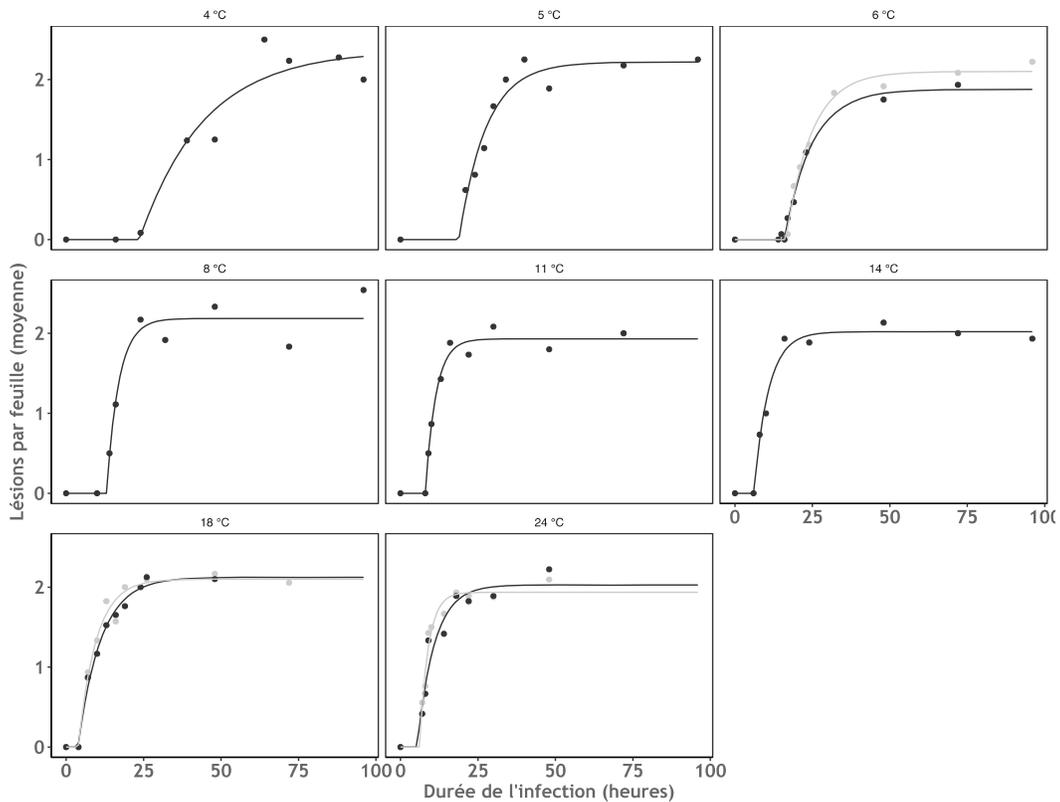


Figure 1. Impact de la période d'infection à différentes températures sur l'apparition des lésions de la tavelure du pommier suivant l'inoculation en laboratoire avec des ascospores. La relation a été modélisée avec une fonction monomoléculaire avec décalage horizontal. Les expériences à 6, 18 et 24 °C ont été réalisées 2 fois.

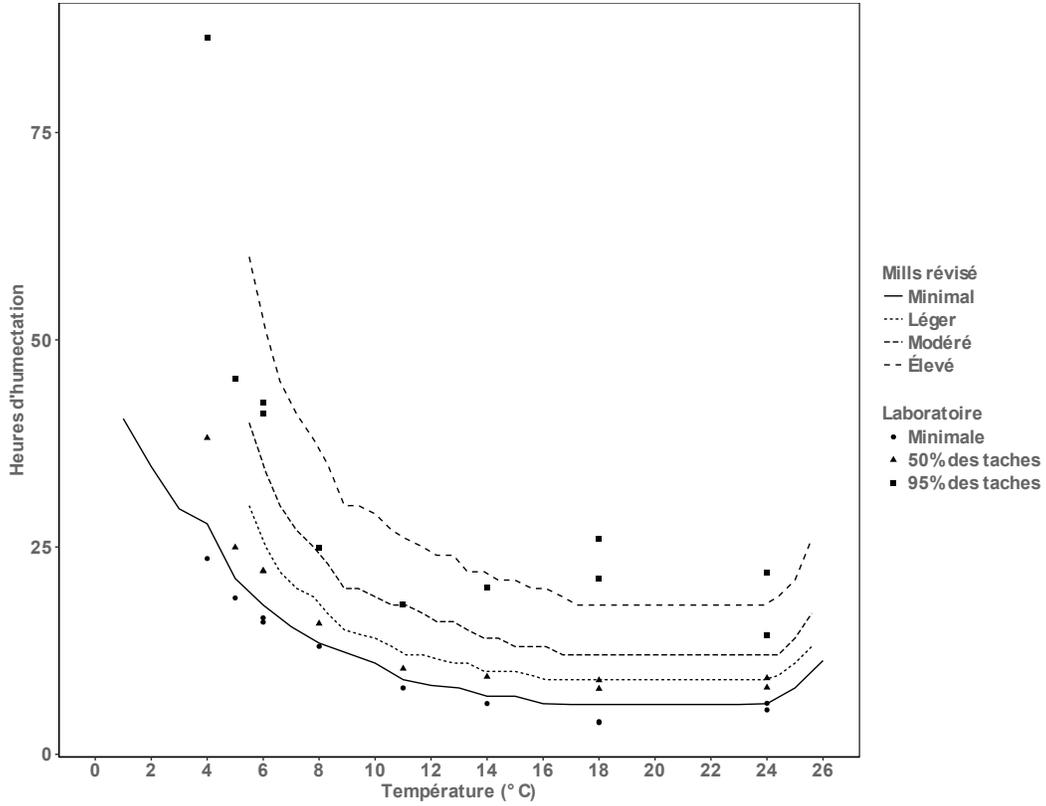
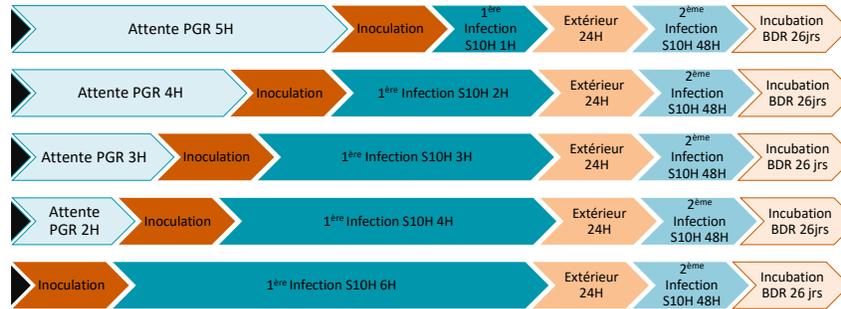


Figure 2. Comparaison du risque selon Mills à la sévérité des infections observées suite à une inoculation au laboratoire. Le temps requis pour une infection minimale, 50% et 95% des taches a été obtenu par régression non linéaire de la relation du nombre de taches obtenu dans le temps pour chaque température. Les expériences à 6, 18 et 24 °C ont été réalisées 2 fois.

Volet survie des ascospores en conditions sèches

Approche 1 :



Schématisation du déroulement des expériences de l'approche 1. Pour assurer une période d'exposition extérieure identique pour tous les pommiers, une période d'attente variable avait lieu avant l'inoculation. Pendant la période d'attente, d'inoculation et d'infection les arbres étaient soumis à des conditions de température et de lumière identiques, les arbres étaient mouillés pendant la période d'inoculation et d'infection. L'exposition à l'extérieur, la deuxième période d'infection et l'incubation étaient simultanées pour tous les arbres. Des témoins non exposés à l'extérieur inoculés en même temps que les autres ou inoculés avant la deuxième période d'infection sur les feuilles exposées lors de l'inoculation des autres arbres ont servi de référence pour établir la sévérité maximale des infections. (schéma : Marina Guay).

La survie a été modélisée suivant une courbe mono-moléculaire où la sévérité maximale de la tavelure attendue est fonction de la durée de l'humectation initiale et de l'inoculum de départ. Pour les deux essais, la période sèche extérieure était de 24h.

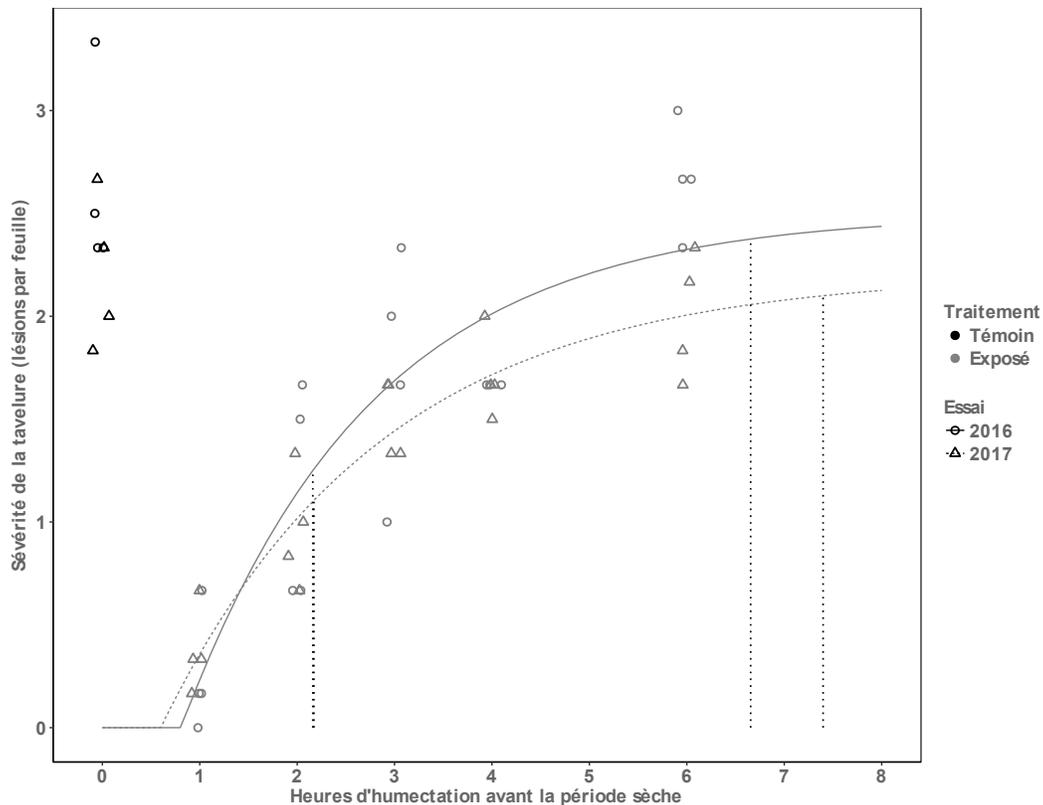


Figure 3. Progression de la sévérité de la tavelure après inoculation et une première période d'humectation à 18°C d'une durée variable. Les arbres ont ensuite été exposés simultanément à une période sèche à

l'extérieur et finalement à une période d'infection optimale. Les arbres du témoin n'ont pas été exposés à l'extérieur. Les heures requises pour une survie minimale (Tini) étaient de 0.8 heures en 2016 et 0.6 heure en 2017. Le temps d'humectation initiale pour atteindre 50% des taches (2.2 heures) et 95% (6.7 heures en 2016 et 7.4 heures en 2017) sont représentés par les pointillés verticaux. Les valeurs de Tini et du temps requis pour différents niveaux de survie ont été obtenu par régression non linéaire (La fraction vivante = $1 - \exp(-k*(H-Tini))$) où H est la durée d'humectation initiale et Tini est la durée minimale d'humectation avant que la survie soit mesurable. Le taux d'accroissement (k) = 0.48. La sévérité de la tavelure dans le témoin de chaque essai a été utilisée pour modéliser l'asymptote de la fonction monomoléculaire.

Approche 2.

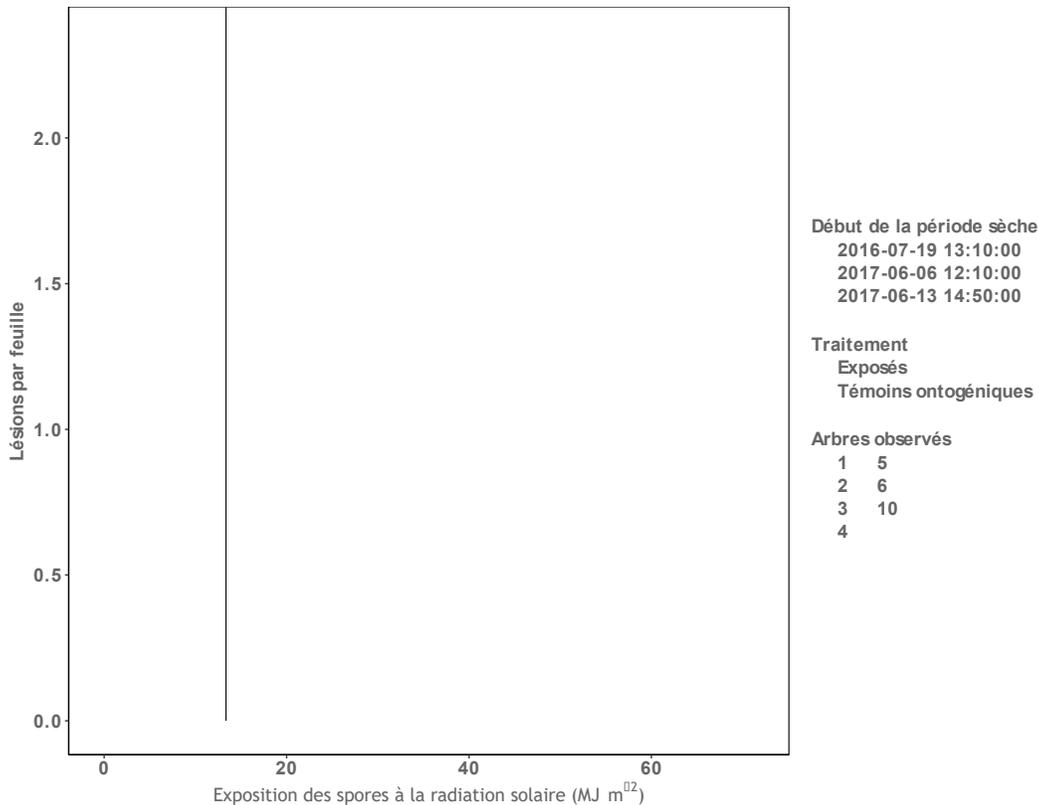


Figure 4. Sévérité de la tavelure après inoculation, une période d'humectation de 3 heures à 18°C, séchage et une exposition à l'extérieur pour une durée variable. Après exposition, les arbres ont été incubés pendant 24 h dans une chambre d'humectation pour favoriser l'infection des spores encore vivantes. Les arbres du témoin ontogénique ont été inoculés après exposition. Le nombre de taches dans le témoin exposé (radiation = 0) était variable selon l'expérience mais l'effet du rayonnement sur la sévérité n'était pas différent pour les trois expériences. La sévérité de la tavelure a été modélisée avec une régression de Poisson avec une ordonnée par expérience. La fraction vivante = $\exp(-0.05*M)$ où M est l'exposition ($MJ m^{-2}$). Le rayonnement nécessaire pour 50% de mortalité était de $13.9 MJ m^{-2}$ [10.8 à 17.6], soit environ 13.5 heures (moyenne globale de 286 watts m^{-2} pendant les périodes d'exposition).

Modélisation de l'effet combiné de la distribution des infections et d'une période sèche.

Le temps minimal d'humectation et le taux d'accroissement de la survie varient en fonction de la radiation solaire pendant la période sèche.

$$\text{Humectation minimale initiale (heures) } Tini = ((-5.7*2)/(0.05*E+1))+5.7$$

Taux d'accroissement $k = ((1-0.296)/(0.1 \cdot E + 1)) + 0.296$
E est l'exposition en MJ m².

Sévérité de l'infection prédite (en proportion du maximum) en fonction du temps d'humectation avant la période sèche (H) = $1 - \exp(-k \cdot (H - T_{ini}))$.