



Rapport Final

Portrait sommaire de la tolérance de différentes populations de *Venturia inaequalis* aux fongicides commerciaux utilisés pour réprimer la tavelure du pommier.

Date : 16 juin 2026 (Corrections finales et mise en ligne le 12 octobre 2026)

Responsable scientifique : Vincent Phillion, agr.

Ce rapport a été produit à l'attention de :
Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresse** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Vincent Philion, agr.
Chercheur en phytopathologie pomicole
Responsable scientifique et auteur principal
T : 514 606-8275.
vincent.philion@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Vincent Philion, agr., IRDA
Louis Desrochers, M. Sc., IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

Photo de couverture

Ascospore de *Venturia inaequalis* avec tube germinatif et appressorium, observée en microscopie optique.

Ce rapport peut être cité comme suit :

Philion, V. et L. Desrochers. 2026. Portrait sommaire de la tolérance de différentes populations de *Venturia inaequalis* aux fongicides commerciaux utilisés pour réprimer la tavelure du pommier. Rapport final. IRDA et partenaires. 10 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Résumé

L'utilisation de certains traitements fongicides pour lutter contre la tavelure du pommier est sujette à des risques de résistance. Des tests *in vitro* en milieu liquide mesurant la croissance du champignon *Venturia inaequalis* en présence de fongicides commerciaux ont révélé une grande disparité de sensibilité entre les populations provenant de différents vergers du Québec. Les résultats ont montré une augmentation significative de l'EC₅₀ au verger de l'IRDA pour le groupe 11 (Flint) entre 2012 et 2025, mais une diminution significative de l'EC₅₀ pour les groupes 7 (Fontelis) et 29 (Allegro) au cours de la même période. Les travaux ont montré qu'il est possible en principe d'interpréter les résultats *in vitro* et de les traduire en efficacité agronomique en verger. L'hétérogénéité intra-population constitue toutefois une source de variation du même ordre de grandeur que certaines différences historiques de sensibilité et doit être mieux quantifiée avant qu'une recommandation de dose individualisée puisse être proposée à l'échelle du verger. Les résultats permettent ainsi de cerner les principaux obstacles scientifiques qui devront être résolus avant qu'une stratégie de suivi de la résistance puisse être utilisée pour moduler les recommandations de dose en fonction de la sensibilité propre à chaque verger.

1 INTRODUCTION

La tavelure du pommier constitue un frein majeur à la production de pommes de qualité dans les climats humides comme celui du Québec. Chaque année, les producteurs sont contraints d'appliquer différentes matières fongicides pour réprimer les infections causées par cette maladie. L'utilisation répétée de fongicides issus d'un même groupe FRAC (Frac n.d.) impose une pression de sélection sur le champignon responsable de la tavelure (*Venturia inaequalis*). Cette pression, variable selon la fréquence d'utilisation et le type de fongicide, mène graduellement à l'établissement de populations résistantes de l'agent pathogène et en principe à une baisse de l'efficacité des traitements. Dans certains cas, cette perte d'efficacité peut mener à des échecs de contrôle même à la dose maximale homologuée.

L'érosion de l'efficacité des fongicides devient particulièrement problématique dans un contexte où les contraintes réglementaires limitent l'utilisation de plusieurs produits à faible risque de résistance. Cette situation accentue la pression exercée sur les groupes FRAC encore efficaces, alors même que l'homologation de nouvelles familles chimiques demeure un processus lent. En pratique, la perte d'efficacité est généralement constatée à la suite de l'apparition inattendue de symptômes de tavelure et entraîne des traitements additionnels afin de maintenir la qualité de la récolte.

Dans ce contexte, il pourrait être utile aux producteurs de connaître l'état actuel de la résistance aux différents groupes FRAC disponibles afin d'optimiser le choix des traitements pour la population présente. Ce type d'analyse peut être réalisé à l'échelle d'un territoire (portrait régional) ou à l'échelle d'un verger individuel (diagnostic). Les portraits régionaux sont utiles pour guider les politiques et documenter l'évolution de la résistance, mais demeurent rarement utiles pour orienter les choix de traitements à l'échelle d'un verger, sauf lorsque la résistance est clairement absente ou bien établie sur le territoire. Les situations intermédiaires peuvent toutefois accélérer l'abandon de produits encore efficaces, par crainte que la résistance soit présente dans des vergers non inclus dans le portrait régional.

Il existe différentes stratégies pour estimer la résistance des populations de spores envers chacun des fongicides. Idéalement, les tests devraient être réalisés sur des pommiers inoculés avec des populations de spores provenant de chaque verger et traités selon un protocole standardisé afin que l'efficacité puisse être comparée entre les populations. Cependant, les tests « in planta » sont très coûteux à mettre en place puisqu'ils requièrent des arbres en croissance, des installations adéquates pour la pulvérisation, l'inoculation standardisée, l'incubation des arbres, etc. L'alternative la plus commune consiste à mesurer la croissance du champignon « in vitro » à l'aide de tests en laboratoire sur milieu liquide ou solide. Ces tests sont plus rapides, mais comportent plusieurs lacunes. D'abord, les essais au laboratoire ne peuvent reproduire adéquatement l'interaction complexe entre la plante et le pathogène. Leur pertinence varie donc selon le mode d'action du produit testé. La relation entre la sensibilité *in vitro* et *in planta* doit ainsi être établie afin de confirmer l'existence d'un lien agronomique entre les deux approches et de déterminer dans quelle mesure cette relation peut être généralisée entre les fongicides. Pour certains fongicides utilisés contre la tavelure, ce lien n'est pas simple (Kunz et al. 1998). Par ailleurs, les tests *in vitro* et *in planta* sont souvent réalisés à partir d'un nombre limité de souches qui ne représentent pas adéquatement les populations de spores présentes dans les vergers. À cette difficulté s'ajoute celle de la représentativité des vergers sélectionnés pour les portraits régionaux. Une bonne représentativité des populations de spores à l'échelle d'un verger ne garantit pas une bonne représentativité des vergers à l'échelle du territoire. Comme la sélection des vergers pour les tests n'est généralement pas aléatoire, les résultats demeurent difficilement généralisables. Les vergers où les problèmes de tavelure sont fréquents sont souvent ciblés pour les tests de résistance. Or, comme la résistance est souvent à l'origine des problèmes de tavelure, il s'ensuit que les populations de spores testées sont probablement plus tolérantes que la distribution réelle à l'échelle du territoire. Malgré les efforts pour inclure des vergers diversifiés, cette lacune inhérente aux campagnes de suivi de la résistance demeure difficile à éviter.

Les approches de dépistage moléculaire ne répondent pas non plus entièrement à ces préoccupations et peuvent parfois compliquer l'interprétation des diagnostics et des portraits régionaux. La présence d'une mutation associée à la résistance, comme G143A pour les Qol, n'est pas nécessairement garante d'une réduction mesurable de l'efficacité du fongicide à l'échelle agronomique. La relation entre la fréquence d'une mutation dans une population et la réponse biologique observée demeure souvent non linéaire et dépend du fongicide ainsi que du système étudié. Dans plusieurs cas, les marqueurs moléculaires doivent donc être interprétés davantage comme des indicateurs de risque que comme une mesure directe de

l'efficacité attendue au champ. Par ailleurs, des marqueurs moléculaires ne sont pas disponibles pour toutes les formes de résistance observées chez *Venturia inaequalis*. Les approches moléculaires et les bioessais demeurent ainsi complémentaires plutôt qu'interchangeables.

Pour limiter une partie de ces problèmes, nous avons choisi, dans l'ensemble de nos projets, de tester la sensibilité de populations entières de spores plutôt que de souches clonales (Philion et al. 2023). Les tests proposés s'appuient sur la production d'ascospores issues de la reproduction sexuée, ce qui permet de mieux représenter la diversité des populations présentes dans les vergers. Les essais *in vitro* réalisés dans le cadre de ce projet ont ainsi été conçus pour mieux représenter les populations de spores des vergers échantillonnés. Ils ne peuvent toutefois se substituer entièrement à des essais sur pommiers et ne permettent pas de conclure quant à la prévalence territoriale de vergers présentant une sensibilité réduite pour l'un ou l'autre des fongicides testés.

L'objectif de ce projet était d'explorer la variabilité de la résistance *in vitro* observée dans quelques vergers en lien avec un portrait plus ancien (Philion and Joubert 2014) et de relier ces résultats à l'efficacité agronomique des fongicides homologués.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

Des feuilles tavelées provenant de quatre régions pomicoles ont été recueillies en juin ou octobre des années 2024 et 2025. Les feuilles ont été incubées de sorte que le champignon responsable de la tavelure puisse compléter son cycle sexué et produire des ascospores. Sur réception, les échantillons de feuilles ont été placés directement à l'obscurité, face abaxiale vers le haut, dans des incubateurs à 4°C pendant 12 à 20 semaines selon le moment de la cueillette des feuilles (automne vs été) afin de favoriser la production de pseudothèces. Pendant la période d'incubation, un système de gicleurs intermittents (5 min par heure) a été utilisé en continu pour maintenir les feuilles humectées. Chaque échantillon a ensuite été observé et tous les échantillons présentant une quantité suffisante d'ascospores matures ont été congelés jusqu'au début des tests de résistance. Les échantillons avec des pseudothèces encore immatures ont été incubés davantage selon leur état d'avancement.

Avant le début des tests, les échantillons ont été sortis du congélateur et placés dans des grillages adaptés à des pièges d'éjection conçus pour permettre la collecte à sec des ascospores dans des fioles de type Eppendorf. Cette méthode permettait l'obtention d'un culot concentré d'ascospores. Au moment des tests, les échantillons ont été remouillés toutes les 20 min pendant 2 heures afin de favoriser l'éjection des spores à maturité. Après chaque éjection, les échantillons ont été conservés au sec à 18°C et à la noirceur afin de favoriser la maturation tout en inhibant l'éjection. Les échantillons étaient éjectés deux fois par semaine ou, au minimum, remouillés lorsque des tests n'étaient pas réalisés.

Des ascospores fraîchement éjectées ont été utilisées pour chaque expérience. Les ascospores ont été resuspendues dans des plaques de 96 puits contenant 24 g/L de PDB (potato dextrose broth) et les fongicides testés. Les spores ont été exposées jusqu'à 11 doses de chaque produit (médiane = 7), à raison d'un puits par concentration de fongicide et par expérience, ainsi qu'à 1 à 4 puits témoins sans fongicide. Les formulations commerciales de fongicides ont été utilisées pour chaque produit testé. La gamme de concentrations testées a été ajustée pour chaque produit à partir d'expériences préliminaires de sorte que la croissance soit approximativement maximale à la dose la plus faible et presque nulle à la dose la plus élevée. Le nombre de produits testés par expérience et par verger a été ajusté selon la quantité de spores éjectées pour chaque échantillon, tout en conservant un nombre similaire de spores entre les puits d'une même expérience (400 ascospores visées par puits). Chaque fongicide a été testé une seule fois par site et par année, mais quelques combinaisons ont été dupliquées entre les années. La variabilité des résultats par fongicide a été testée pour 3 produits pour les échantillons de l'IRDA.

Les plaques ont été incubées à température ambiante, d'abord sans agitation pendant 16 heures afin de favoriser la formation et l'adhésion d'appressoria, puis sous agitation jusqu'au moment de l'observation, soit 48 heures après

inoculation. La méthode du recouvrement linéaire a été utilisée pour évaluer au microscope (200×) la densité mycéliale par rapport à une grille standardisée fixée à l’oculaire.

Les données ont été analysées sous R avec les outils tidyverse (Wickham et al. 2019). Pour chaque verger et chaque produit, la relation dose-réponse a été modélisée selon la fonction log-logistique (LL.3) du package drc (Ritz et al. 2015) . La dose qui inhibe 50 % de la croissance, soit le EC₅₀, a été rapportée pour chaque combinaison verger et produit.

Région	Nombre de Verger
Estrie	2
Laurentides	2
Montérégie Est	9
Montérégie Ouest	13
Total général	26

Au total, neuf formulations commerciales couvrant sept groupes FRAC ont été incluses dans les tests. Selon la production de spores obtenue pour chaque verger, le nombre de formulations commerciales testées était variable.

Les produits inclus dans les essais étaient : Fontelis (penthiopyrad, groupe 7, SDHI), Aprovia (benzovindiflupyr, groupe 7, SDHI), Nova (myclobutanil, groupe 3, IBS), Cevya (mefentrifluconazole, groupe 3, IBS), Flint (trifloxystrobine, groupe 11, QoI), Scala (pyriméthanol, groupe 9, AP), Syllit (dodine, groupe U12), Allegro (fluazinam, groupe 29) et Captan (groupe M). Des résultats issus d’un projet antérieur similaire (Philion and Joubert 2014) et des résultats non publiés en lien avec l’efficacité des fongicides (Philion et al. 2023) ont également été inclus dans l’analyse à des fins de comparaison.

3 RÉSULTATS

De tous les échantillons récoltés sur les deux années, nous avons pu obtenir des populations d’ascospores suffisantes dans 14 vergers. Au total, 11 expériences ont généré 103 courbes dose-réponse log-logistiques, couvrant 2 à 9 fongicides par site (médiane : 5) et 6 à 14 sites différents par fongicide (médiane : 11). L’accord global entre la croissance observée et celle estimée par le modèle était élevé (coefficient de corrélation de concordance [CCC] = 0,880 à 0,999). Faute de données de sensibilité pour des populations historiques de référence propres à chaque produit, seule la variation relative de sensibilité entre populations (EC₅₀ max/EC₅₀ min) a été rapportée, plutôt qu’un facteur de résistance absolu (Figure 1). L’amplitude de variation différait fortement selon les fongicides, allant d’un facteur inférieur à 3 (Syllit) à plus de 6000 (Flint). Dans tous les cas, les EC₅₀ pour les fongicides aux extrêmes de la distribution étaient bien bornés par rapport à la gamme de concentration testée.

La population du verger de l’IRDA (A) se situait généralement parmi les plus sensibles (EC₅₀ faibles ou proches de la médiane), à l’exception du Flint et du Scala. Pour les cinq fongicides testés à la fois pour les populations de 2024 et de 2025 au verger de l’IRDA, les EC₅₀ étaient plus faibles en 2025 qu’en 2024. À l’inverse, dans le seul autre verger évalué sur deux années (verger G), une tendance opposée a été observée, avec des EC₅₀ plus élevées en 2025 (Figure 2). Ces résultats suggèrent qu’il serait possible de détecter les différences de sensibilité à l’échelle annuelle, du moins pour les populations qui ne sont pas très variables entre échantillons.

Pour 11 des 36 paires possibles de fongicides, les corrélations directes entre EC₅₀ ont pu être évaluées (n ≥ 8 vergers communs). Les paires impliquant les groupes 3, 11 et U12 n’ont pas pu être évaluées faute d’un nombre suffisant de vergers communs. Trois paires ont montré une corrélation positive significative (Figure 3), dont deux entre des produits issus de groupes FRAC différents.

Nous avons étudié la cooccurrence des EC_{50} élevés à l'échelle du verger. Dans le verger D, les cinq fongicides testés, représentant quatre familles FRAC, présentaient des EC_{50} situées dans le décile supérieur de toutes les valeurs observées pour leur matière active respective. Ce regroupement de valeurs élevées dépassait le 95e percentile des simulations fondées sur l'hypothèse d'une sélection indépendante des résistances entre familles FRAC. Ces résultats suggèrent que les niveaux de tolérance observés dans ce verger ne résultent pas d'une accumulation aléatoire de résistances indépendantes. Le même phénomène a été observé dans le verger J, où les EC_{50} de 8 fongicides sur 9 dépassaient la médiane des valeurs observées pour leur matière active respective. Bien que plus fréquent que dépasser un percentile élevé, un tel regroupement de valeurs élevées est également improbable sous l'hypothèse d'une sélection indépendante. À l'inverse, aucun EC_{50} n'était dans le décile supérieur pour les populations de 8 vergers, incluant celui de l'IRDA. Cette fréquence de verger avec des populations sensibles à tous les fongicides est normale sous un régime de sélection indépendante.

La corrélation globale entre les EC_{50} de Fontelis et d'Aprovia était attendue, ces deux produits contenant un fongicide du groupe 7. En revanche, les autres corrélations pourraient refléter une co-variation partielle de la sensibilité entre certaines familles de fongicides sans nécessairement traduire une résistance croisée. Par exemple, les différences entre vergers dans l'intensité et la composition des programmes de traitement pourraient exercer des pressions de sélection parallèles sur plusieurs groupes FRAC. Les vergers ayant davantage recours aux fongicides unisites pourraient ainsi présenter une sensibilité réduite à plusieurs groupes indépendamment des mécanismes de résistance propres à chacun, donnant l'apparence d'une résistance croisée.

Pour les 27 formulations commerciales testées sur pommiers en pots (Philion et al. 2023), les tests au laboratoire ont révélé une relation linéaire à l'échelle $\log_{10}$ - $\log_{10}$ entre l' EC_{50} *in vitro* et celle obtenue avec la tavelure *in planta* (Figure 4). Comme les valeurs de EC_{50} obtenues *in vitro* et *in planta* étaient toutes deux associées à une incertitude d'estimation, une régression sur axe majeur (Legendre and Legendre 2012) réalisée avec le package lmodel2 pour R (Legendre 2018) a été utilisée plutôt qu'une régression linéaire ordinaire par moindres carrés. Les résultats obtenus étaient très similaires à ceux de la régression linéaire ordinaire et le modèle plus simple a été retenu. Catégoriser les fongicides selon leur mode d'action améliorait le modèle ($F = 16$, $P < 0.001$), mais la pente de la relation entre les EC_{50} *in vitro* et *in planta* ne variait pas selon le mode d'action (interaction : $F = 0.4$, $P = 0.53$). À EC_{50} *in vitro* égal, les fongicides systémiques présentaient des EC_{50} contre la tavelure environ 5.3x plus faibles que les fongicides de contact (coefficient = -0.72, $t = 4$, $P < 0.001$). Une augmentation de 10 fois du EC_{50} mesuré *in vitro* était associée à une augmentation de 1.74x du EC_{50} contre la tavelure (coefficient = 0.24, $t = 5.3$, $P < 0.001$). L'absence d'interaction entre le mode d'action et la EC_{50} *in vitro* indique que la relation entre les EC_{50} mesurées *in vitro* et sur pommier est décrite par une pente commune à tous les modes d'action.

Cette relation a été établie pour une seule population de spores (verger IRDA), mais le même principe pourrait s'appliquer entre populations. Pour un produit donné, les différences de sensibilité mesurées *in vitro* entre populations devraient alors se traduire par des différences correspondantes d' EC_{50} sur pommier. Si tel est le cas, et si la pente de la relation log-log entre les EC_{50} *in vitro* et sur pommier demeure commune aux différents produits, le ratio des EC_{50} sur pommier pour n'importe quel produit et n'importe quelle population dépendrait simplement du ratio des EC_{50} mesurées *in vitro*, élevé à la puissance correspondant à cette pente, soit $(EC_{50} \text{ max} / EC_{50} \text{ min})^{0.24}$.

Malgré les différences importantes entre les formulations et les modes d'action testés, l'absence d'interaction significative suggère qu'une relation commune pourrait permettre de traduire les variations de sensibilité mesurées *in vitro* en recommandations agronomiques de dose pour différents produits, à condition que le suivi de la sensibilité soit réalisé avec le même produit au fil du temps, sans qu'il soit nécessaire de disposer de résultats d'efficacité sur pommiers pour chacun d'eux.

En combinant l'amplitude de variation des EC_{50} observée *in vitro* pour chaque fongicide pour les collectes de 2024 et 2025 (Figure 1) avec la relation entre les EC_{50} mesurées *in vitro* et l'efficacité observée sur pommiers en 2021 (Figure 4), ainsi qu'avec le facteur d'équivalence entre la EC_{50} sur pommier et la dose procurant une efficacité équivalente en verger (Philion

et al. 2023), il devient possible en principe d'estimer l'augmentation théorique de dose nécessaire pour compenser la plage de sensibilité observée entre les populations les plus sensibles et les plus tolérantes.

En pratique, deux estimations indépendantes de la EC_{50} *in vitro* d'une même population peuvent parfois différer considérablement, même lorsque les ajustements dose-réponse sont de bonne qualité. Par exemple, pour Flint à l'IRDA nous avons observé un facteur de 36x entre l' EC_{50} de 4 échantillons testés (Figure 1). Des différences entre échantillons d'une même population étaient aussi perceptibles dans les données historiques. Par exemple, une variation de 10x entre deux échantillons pour Excalia (Figure 4). Nous avons donc exploré la variabilité géométrique des EC_{50} obtenues à partir de sous-échantillons indépendants d'études antérieures.

En combinant les résultats de 2011 à 2013 (rapport de 2014), les résultats *in vitro* de 2022 (non publiés) et ceux de la présente étude, nous avons constitué un jeu de données comprenant 26 vergers ayant fait l'objet d'essais répétés. Avant regroupement par date d'éjection, 148 groupes définis par le verger, l'année, le fongicide et la méthode comportaient de deux à cinq courbes dose-réponse. Ces répétitions permettent d'examiner la variabilité des EC_{50} obtenues pour une même population, mais plusieurs courbes peuvent provenir d'un même événement d'éjection.

Pour distinguer ces niveaux de répétition, les EC_{50} provenant d'une même date d'éjection ont été regroupées par leur moyenne géométrique au sein de chaque groupe. Un modèle bayésien ajusté aux $\log_{10}(EC_{50})$ avec le package brms a ensuite permis de modéliser la dispersion entre éjections en fonction du fongicide, avec un effet aléatoire associé à l'échantillon de verger $\times$ année. Cette analyse suggère une composante de variabilité commune aux différents fongicides testés sur un même échantillon de verger. L'écart-type de l'effet aléatoire associé à l'échantillon sur le logarithme de la dispersion résiduelle était estimé à 0,36 (intervalle crédible à 95 % : 0,10–0,64). Sans l'échantillon A.2012, dont la dispersion est faible pour les sept fongicides étudiés, cette estimation diminuait à 0,25 (0,03–0,52). L'ampleur de cette composante demeure donc incertaine et dépend en partie de cet échantillon.

La variabilité entre éjections pourrait refléter la composition des populations, leur représentation dans les sous-échantillons ou des conditions expérimentales communes. Les courbes dose-réponse retenues étaient généralement bien ajustées, et la variabilité entre sous-échantillons persistait après l'exclusion des ajustements de faible qualité. Toutefois, la contribution de l'incertitude d'estimation des EC_{50} à cette variabilité n'a pas été quantifiée.

Bien qu'environ 400 ascospores soient visées par puits, ce nombre ne renseigne pas directement sur le nombre de feuilles et de pseudothèces représentées dans l'inoculum. Il ne correspond donc pas à la taille effective de l'échantillon biologique ayant servi à représenter la population du verger. Une hypothèse plausible est que différents sous-échantillons contiennent des proportions différentes de génotypes présentant des sensibilités contrastées. La composante de dispersion commune aux fongicides est compatible avec cette hypothèse, sans en démontrer l'origine.

Les différences entre sous-échantillons peuvent entraîner des écarts appréciables entre les doses théoriques qui en sont dérivées, malgré l'amortissement associé à la relation entre les EC_{50} mesurées *in vitro* et sur pommier. Dans le jeu de répétitions initial, la médiane des rapports entre la plus forte et la plus faible dose théorique au sein des groupes était de 1,40, et leur 90e percentile de 2,09. Ces étendues illustrent la variabilité d'une estimation fondée sur un seul sous-échantillon; elles ne constituent pas des intervalles de confiance sur la dose et ne permettent pas de lui attribuer une précision garantie.

Les données disponibles ne permettent pas encore de déterminer dans quelle mesure cette variabilité des EC_{50} se traduit par des différences d'efficacité sur pommier. L' EC_{50} *in vitro* pourrait être particulièrement sensible à la composition du sous-échantillon, alors que la protection du pommier reflète différemment la réponse de l'ensemble des spores. Une

hétérogénéité de sensibilité pourrait aussi modifier la dose nécessaire pour atteindre un niveau de protection donné. La relation entre ces réponses devra être examinée directement.

Un projet futur devrait donc relier les EC_{50} *in vitro* à l'efficacité sur pommier pour plusieurs populations et plusieurs sous-échantillons par population. Il devrait évaluer l'effet de la sensibilité moyenne et de sa variabilité sur la protection obtenue, ainsi que l'effort d'échantillonnage nécessaire pour appuyer une recommandation de dose. L'augmentation du nombre de feuilles contribuant au mélange d'ascospores constitue une piste à tester. La période de collecte devrait également être considérée, puisque des variations saisonnières de sensibilité ont été rapportées pour les inhibiteurs de la déméthylation des stérols (Köller et al. 1995).

Une meilleure compréhension de cette variabilité faciliterait aussi l'interprétation des changements historiques. À l'IRDA, l' EC_{50} de Cevya a diminué entre 2021 et 2025, ce qui correspond à une hausse de sensibilité, alors que celle de Nova est demeurée relativement stable entre 2012 et 2025 (Figure 2). Des variations sont également observées pour Aprovia et Fontelis. En l'absence de répétitions suffisantes pour certains produits et certaines années, il demeure difficile de distinguer une évolution de la population d'un effet de sa représentation dans les sous-échantillons. Les changements de méthode entre campagnes, notamment le passage des matières actives techniques aux formulations commerciales, doivent également être considérés.

La variabilité entre répétitions n'est pas connue pour Aprovia. Pour Fontelis, les comparaisons indiquent une diminution significative de l' EC_{50} entre 2012 et 2021 (facteur de 4,8; $t = 4,2$; $p = 0,01$), puis entre 2021 et 2025 (facteur de 4,4; $t = 4,2$; $p = 0,01$), soit un facteur combiné d'environ 21. Pour Allegro, l' EC_{50} a diminué significativement entre 2012 et 2021 (facteur de 13,8; $t = 9,2$; $p = 0,003$). Pour Flint, la comparaison entre 2012 ($EC_{50} = 0,015$ ppm [0,003; 0,087]; $n = 3$ courbes) et 2025 ($EC_{50} = 1,4$ ppm [0,31; 6,46]; $n = 4$ courbes) indique une diminution de sensibilité d'environ 90 fois ($t = 5,0$; $p = 0,004$). Les 11 traitements avec Flint cumulés entre 2022 et 2025 dans le verger de l'IRDA pourraient avoir contribué à cette évolution.

En l'absence de répétitions récentes suffisantes pour les vergers C et G et pour plusieurs fongicides à l'IRDA, aucune autre comparaison formelle n'a pu être réalisée entre années. L'évolution des EC_{50} de Scala à l'IRDA suggère néanmoins une diminution de sensibilité entre 2012 et 2025. À l'inverse, les baisses observées pour Fontelis et Allegro indiquent que les échantillons récents étaient plus sensibles *in vitro* sur les périodes comparées. Elles ne permettent pas, à elles seules, de conclure à une réversion des mécanismes de résistance ou à un rétablissement de l'efficacité au verger.

En guise de complément, nous avons également calculé les doses théoriques au champ correspondant aux extrêmes de sensibilité observés en 2024–2025 (Tableau 1). Ces projections reposent sur l'application aux différences entre populations de la relation établie entre produits pour une population de référence. Elles ne tiennent pas compte de l'incertitude des EC_{50} *in vitro* et sur pommier, de l'effet éventuel de l'hétérogénéité sur la protection, ni de l'incertitude de la conversion vers une dose équivalente au champ.

Selon ces projections préliminaires, les doses correspondant aux populations les moins sensibles demeureraient inférieures aux maxima homologués pour Allegro, Captan et Cevya. Pour les populations les plus sensibles, les doses théoriques représentent de 13 % (Captan) à 144 % (Scala) des maxima homologués. Pour les populations les moins sensibles, elles représentent de 23 % (Captan) à environ dix fois le maximum homologué (Flint). Ces valeurs illustrent les conséquences possibles des différences de sensibilité; elles ne constituent pas des recommandations de traitement.

L'amplitude des EC₅₀ observée en 2024–2025 laisse ainsi envisager des différences d'efficacité entre les populations situées aux extrémités du spectre de sensibilité, notamment pour Flint. Leur ampleur devra toutefois être vérifiée sur pommier.

4 CONCLUSIONS

Dans l'ensemble, les résultats documentent une grande variabilité des EC₅₀ in vitro parmi les populations échantillonnées et entre certains sous-échantillons d'une même population. L'analyse par éjection suggère qu'une composante de cette dispersion est commune aux fongicides, sans permettre d'en déterminer l'origine. La relation observée entre les EC₅₀ in vitro et sur pommier fournit une base pour leur interprétation agronomique, mais son application aux différences entre populations reste à valider. Mieux caractériser la variabilité entre sous-échantillons et sa relation avec la protection des pommiers constitue donc une étape nécessaire pour adapter les recommandations de dose à la sensibilité propre à chaque verger.

5 TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Doses maximales homologuées des produits formulés comparées aux doses théoriques correspondant aux sensibilités observées chez les populations de *Venturia inaequalis*. Les doses théoriques ont été calculées à partir du rapport entre les EC₅₀ in vitro de la présente étude et celles de la population de référence de 2021, de la relation entre les EC₅₀ in vitro et sur pommier, ainsi que du facteur d'équivalence entre l'EC₅₀ sur pommier et la dose au verger (Phillion et al. 2023). Ces projections reposent sur les hypothèses décrites dans le texte et ne constituent pas des recommandations de dose. Les doses sont exprimées en L ha⁻¹ ou en kg ha⁻¹ selon le produit. * Dose théorique supérieure à la dose maximale homologuée.

Fongicide	% matière active	Dose maximale homologuée	Dose théorique pour une efficacité équivalente		
			EC ₅₀ faible	EC ₅₀ moyenne	EC ₅₀ élevée
Allegro	40.0	1.00	0.52	0.65	0.88
Aprovia	10.0	0.50	0.30	0.41	0.59*
Captan	48.0	5.00	0.66	0.96	1.14
Cevya	40.0	0.38	0.07	0.09	0.15
Flint	50.0	0.18	0.22*	0.79*	1.87*
Fontelis	20.0	1.50	0.81	1.26	1.51*
Scala	40.0	1.00	1.44*	2.00*	2.64*
Syllit	40.0	3.65	4.08*	4.58*	5.24*

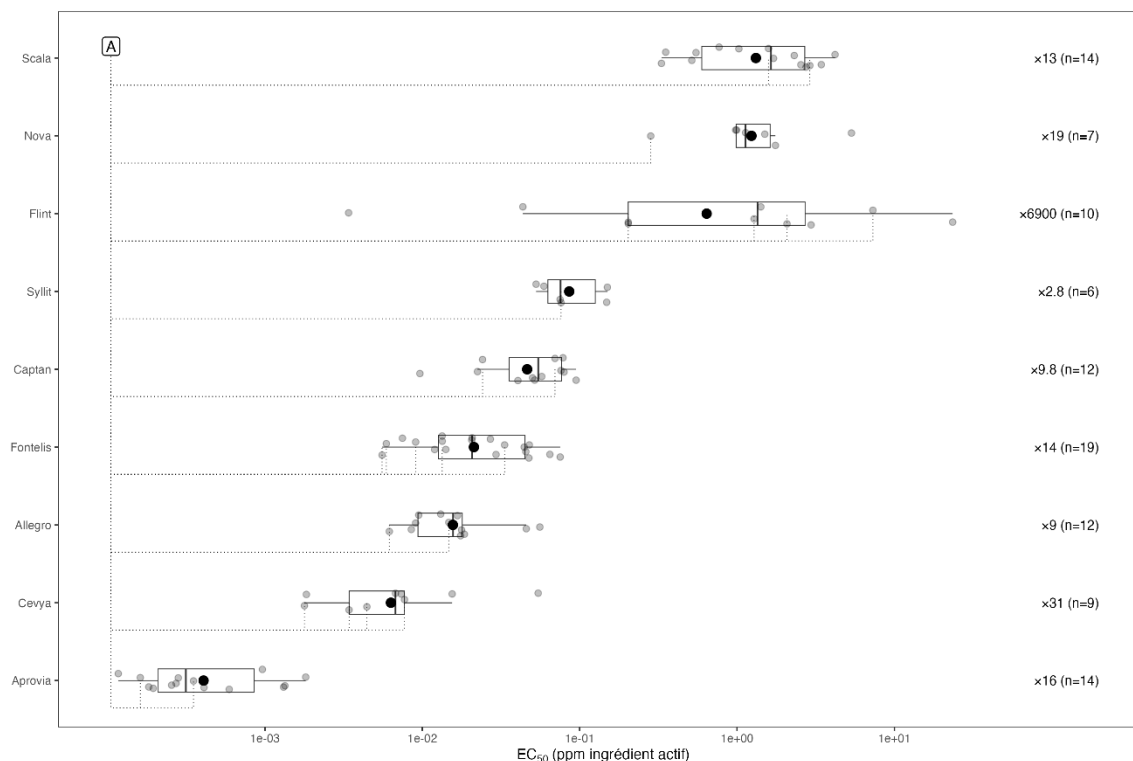


Figure 1. Distribution des EC_{50} mesurées *in vitro* pour différents fongicides pour les populations récoltées en 2024 et 2025. Les points gris représentent les estimations individuelles; plusieurs estimations peuvent provenir d'un même verger. Les boîtes indiquent la médiane et les quartiles, et le point noir représente la moyenne géométrique. Les lignes pointillées relient les valeurs du verger de l'IRDA (A). Les effectifs indiqués correspondent au nombre de courbes dose-réponse. Les valeurs à droite (x) indiquent le rapport entre les EC_{50} maximale et minimale observées pour chaque fongicide.

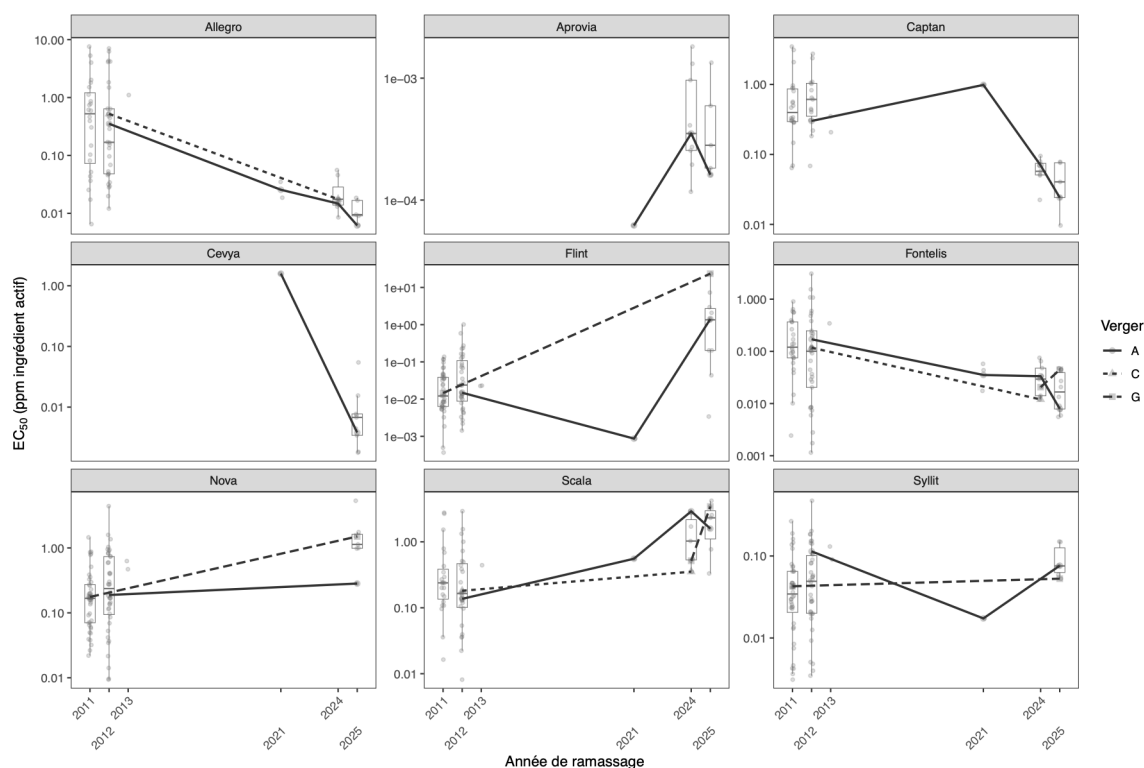


Figure 2. Variabilité temporelle des EC_{50} mesurées *in vitro* pour différentes populations de *Venturia inaequalis* entre 2011 et 2025. Les résultats de 2011 et 2012 proviennent de vergers à travers le Canada. Les points gris représentent les estimations individuelles d' EC_{50} obtenues à partir des différents sous-échantillons analysés. Les boîtes illustrent la distribution des estimations à travers les vergers pour l'année. Les ensembles de vergers représentés diffèrent selon les années. Les lignes relient les valeurs moyennes observées pour les mêmes vergers lors de plusieurs campagnes d'échantillonnage. Les échelles de l'axe Y sont adaptées à chaque fongicide afin de faciliter la visualisation des variations observées.

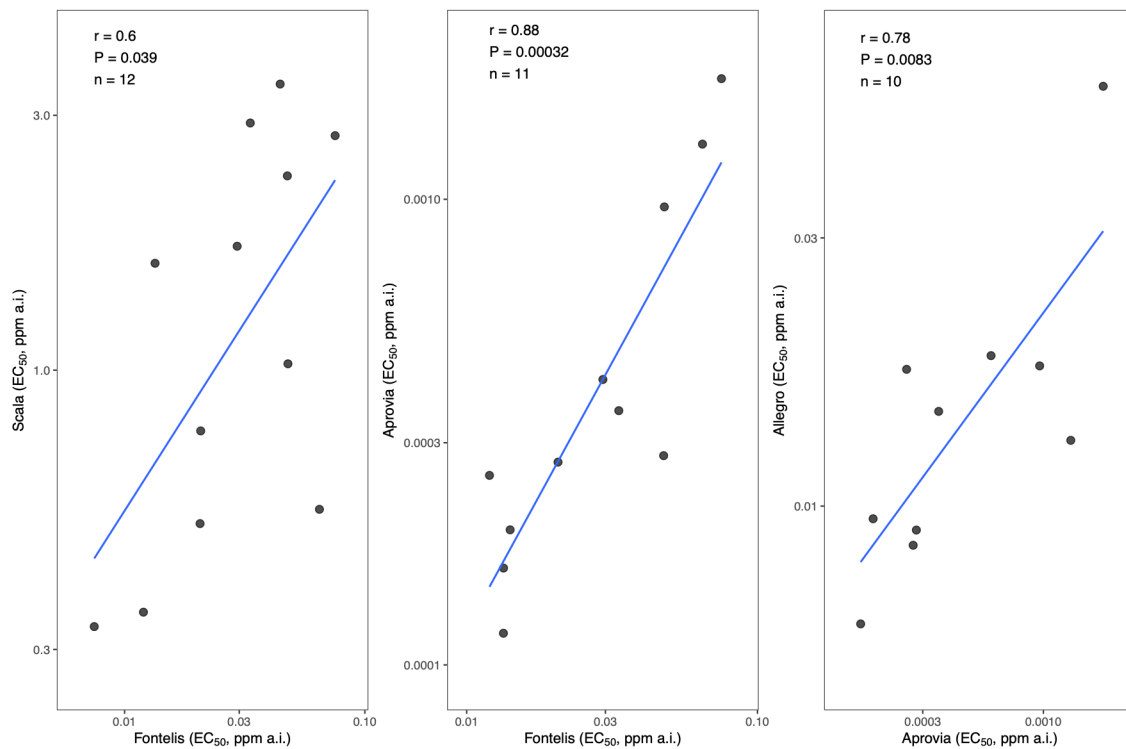


Figure 3. Corrélations significatives ($p < 0,05$; $n \geq 8$ vergers communs) à l'échelle logarithmique entre les EC_{50} des fongicides évalués dans les mêmes vergers.

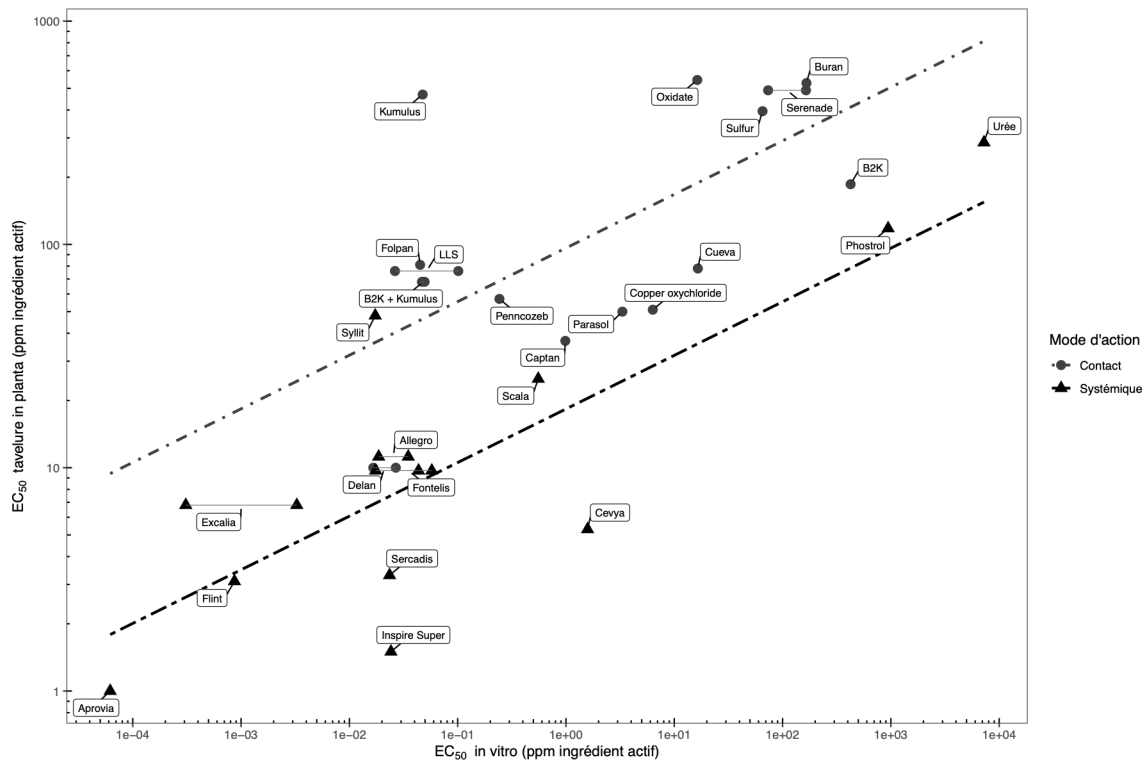


Figure 4. Relation entre les EC_{50} des fongicides estimés *in vitro* à partir de la croissance du champignon en milieu liquide et *in planta* à partir de la tavelure observée sur des pommiers en pots. Les essais sur pommiers ont été réalisés en 2021 et les essais *in vitro* en 2022, à partir d'une même population de *Venturia inaequalis* récoltée en 2021 au verger de Saint-Bruno. Les fongicides ont été regroupés selon leur mode d'action (contact ou systémique). Les lignes pointillées représentent les relations prédites par le modèle linéaire. Les tests *in vitro* ont été répétés indépendamment pour sept des fongicides testés et les résultats individuels ont été reliés par une ligne horizontale.

6 RÉFÉRENCES

- Frac. <http://www.frac.info/frac/index.htm>.
- Köller, W., Smith, F. D., Reynolds, K. L., Wilcox, W. F., and Burr, J. A. 1995. Seasonal changes of sensitivities to sterol demethylation inhibitors in *Venturia inaequalis* populations. *Mycol.Res.* 99:689–692.
- Philion, V., and Joubert, V. 2014. *Portrait de la résistance aux fongicides utilisés pour lutter contre la tavelure du pommier*. MAPAQ. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/1590_Rapport.pdf.
- Philion, V., Joubert, V., Trapman, M., and Stensvand, A. 2023. Physical Modes of Action of Fungicides Against Apple Scab: Timing is Everything, but Dose Matters. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-22-2758-RE>.
- Ritz, C., Baty, F., Streibig, J. C., and Gerhard, D. 2015. Dose-Response Analysis Using R. *PLOS ONE* 10.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemond, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., and Yutani, H. 2019. Welcome to the tidyverse. *J. Open Source Softw.* 4:1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.