

**MISE AU POINT SUR L'UTILISATION DU BICARBONATE DE POTASSIUM POUR
LUTTER CONTRE LA TAVELURE DU POMMIER**

PROJET : IRDA-1-13-AD09

DURÉE DU PROJET : 03/2013 – 02/2015

RAPPORT FINAL

Réalisé par : Vincent Phillion & Valentin Joubert

DATE : 10 juillet 2015

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.

Mise au point sur l'utilisation du bicarbonate de potassium pour lutter contre la tavelure du pommier

Vincent Phillion & Valentin Joubert

Période couverte : 03/2013 – 02/2015

FAITS SAILLANTS (résumé du projet)

Au cours 2013 et 2014, nous avons évalué le bicarbonate de potassium (B2K) pour réprimer la tavelure du pommier pendant la période des infections primaires. Nous avons comparé en verger l'efficacité du B2K par rapport à d'autres produits pour différentes stratégies d'intervention (moments de traitements) pour réprimer la tavelure. Nous avons aussi testé des mélanges de B2K avec des adjuvants pour tenter d'améliorer l'efficacité, ainsi que l'effet de la dose de bicarbonate et du volume de bouillie sur l'efficacité des traitements. Finalement, des essais complémentaires ont été réalisés en laboratoire pour estimer l'effet du pH et de la dureté de l'eau sur l'efficacité du bicarbonate in vitro.

Nous avons observé que le B2K en combinaison avec le soufre pouvait freiner les infections de tavelure et que les applications faites au début de l'infection (moins de 36 h après le début de la pluie) sont les plus efficaces. Le mélange était aussi efficace (2013), voire plus efficace (2014) que la bouillie sulfo-calciqque (bouillie nantaise, LLS) qui est le standard de référence en production biologique. Par contre, l'utilisation intensive du B2K + soufre comme seule stratégie pour réprimer la tavelure n'a pas suffi dans les conditions des essais pour maintenir cette maladie à des niveaux commercialement acceptables. Par ailleurs, le bicarbonate utilisé seul ou en combinaison avec d'autres adjuvants que le soufre s'est avéré moins efficace.

En comparaison avec les standards commerciaux, le B2K en mélange avec le soufre s'est avéré dans la plupart des cas d'efficacité similaire au Captan. Pour les traitements tardifs en post infection, les fongicides Fontelis, Inspire Super et Aprovia étaient plus efficaces que le mélange B2K + soufre. Pour une même quantité de matière active appliquée à l'hectare (B2K et soufre) et pour un même moment d'application, l'incidence de la tavelure était plus élevée dans les parcelles traitées avec 1050 L/ha qu'avec 350 L/ha. L'utilisation d'un volume élevé de bouillie pour remouiller le feuillage est donc à proscrire à moins d'augmenter la dose. Finalement, la dureté de l'eau ou le pH n'avaient pas d'impact sur l'efficacité du B2K.

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

Le bicarbonate de potassium est utilisé en Europe depuis près de 10 ans pour réprimer la tavelure et d'autres maladies du pommier. L'engouement pour le bicarbonate est immense en production biologique puisque ce produit est non toxique, peu coûteux et très efficace. De plus, le bicarbonate peut réprimer le blanc, certaines maladies secondaires en été et aussi aider au contrôle de la charge fruitière. Malheureusement, les nombreuses formulations commerciales de carbonate dans le monde (Armicarb, Astral, Bi-carb, Kaligreen, Milstop, Omni Protect, Vitisan) ne sont pas aussi prisées par les producteurs puisqu'en comparaison avec la matière active utilisée seule, elles ne sont pas toujours plus efficaces, sont beaucoup plus chères et peuvent même être phytotoxiques dans certains cas. Conséquemment, une grande partie de l'utilisation de bicarbonate en pomiculture est actuellement illégale et le mode d'emploi précis de ce produit est appris lentement, aux risques des producteurs. Au Québec, une demande d'homologation de bicarbonate de potassium "générique" est en cours pour régulariser la situation juridique. L'objectif de ce projet visait à préciser certains aspects de l'utilisation du bicarbonate pour être en mesure de bien informer les producteurs dans le cadre de recommandations agronomiques au moment où le produit serait homologué. En outre, le projet visait à mieux cerner les limites d'efficacité en fonction du moment de l'application et la dose minimale requise, et de comparer le bicarbonate avec des produits déjà en usage. De plus, le projet voulait déterminer si les applications en « concentré » qui sont la norme en pomiculture sont possibles avec le bicarbonate, ou si, au contraire, le volume d'eau utilisé lors des traitements a un impact sur l'efficacité. Finalement, le projet avait pour but de répondre à certaines des questions d'usage pratique qui ont été soulevées par les producteurs européens, notamment l'impact de la qualité de l'eau (pH et dureté) sur l'efficacité.

Essais de stratégies (micro-parcelles)

Les expériences ont été réalisées en verger en lien avec les pluies responsables des infections primaires de la tavelure du pommier. Pour les infections visées, différentes stratégies d'applications de fongicides ont été comparées pour différents produits. Les applications pour les traitements avec une stratégie pendant la période de « germination » des ascospores ont été réalisées au moment optimal désigné par le modèle RIMpro pour atteindre le maximum de spores déposées sur le feuillage, mais avant que les critères d'infection soient rencontrés. Les applications en « post-infection » ont été réalisées une fois que les critères d'infection étaient atteints, selon la fenêtre d'intervention visée exprimée en degrés-heures. Par convention, les calculs de degrés-heures (DH en base 0 °C) en post-infection débutaient au moment où la période d'humectation était suffisante pour causer des lésions, et non à partir du début de la pluie. Toutes les applications pendant la germination et pour la stratégie 0 200 DH ont été faites sous la pluie ou sur du feuillage mouillé. Les applications plus tardives (ex. stratégie 200-400 DH) ont été faites sur feuillage sec.

Toutes les applications de produits des traitements comparés ont été faites en dilué, soit avec un fusil à haute pression et avec un volume d'eau suffisant pour couvrir les arbres jusqu'au point de ruissèlement, soit environ 1600 L/ha au moment des

traitements. Les traitements ont été répliqués sur 4-6 arbres choisis de façon aléatoire dans différents secteurs d'un verger uniforme de McIntosh/B9 à maturité planté avec un espacement de 1,25 m x 3,65 m. Des arbres tampons et un panneau portatif ont été utilisés pour éviter la dérive sur les arbres adjacents lors des traitements. L'application des traitements était complétée en 30 minutes ou moins. Le stade phénologique des arbres, l'accumulation de pluie et l'indice de risque de tavelure primaire (RIM) calculé avec le logiciel RIMpro (BioFruitAdvies, NL) ont été colligés pour chaque pluie. En 2013, les traitements comparés ont été appliqués pour toutes les infections primaires, alors qu'en 2014, les comparaisons visaient une infection. L'ordre des applications correspond à l'ordre alphabétique dans le tableau 1 (2013) et le tableau 4 (2014). Pour toutes les autres interventions phytosanitaires, les traitements étaient communs à toutes les parcelles et ont été faits avec un pulvérisateur standard.

Expérience 2013

Les traitements comparés étaient appliqués pour chaque pluie après l'accumulation de 0-200 DH, 200-400 DH, ou 400-600 DH après l'infection initiale. Selon la température, des traitements de différentes stratégies ont eu lieu le même jour à différents moments dans la journée. Les produits appliqués dans les délais prescrits pouvaient à la fois réprimer plusieurs infections et n'étaient donc pas répétés pour chaque infection. Aucun traitement n'a été appliqué pour l'infection marginale du 2 juin (RIM = 2) et pour la dernière infection primaire enregistrée (RIM = 59). Pour chaque stratégie, le même produit a été utilisé pour toutes les applications. Comme les dernières infections primaires ont eu lieu après l'apparition des premiers symptômes sur les arbres témoins, il est possible qu'une partie des taches observées dans les traitements soient liées à des infections secondaires.

Expérience 2014

Les traitements comparés visaient l'infection clef de la saison, survenue les 16-17 mai au stade bouton rose du cultivar McIntosh. Au moment de l'infection choisie pour les tests, une forte proportion des ascospores de la saison était prête à l'éjection selon le logiciel RIMpro. Comme les symptômes des premières infections de la saison n'ont été observés que le 26 mai sur des arbres non traités, les spores secondaires (conidies) n'ont vraisemblablement pas contribué à cette infection. Les traitements ont été appliqués soit pendant la pluie (16 mai), mais juste avant le début de l'infection prédite (21 h) (germination des ascospores), soit pendant la pluie, durant les premières heures suivant le début de l'infection (post-infection, 100 DH) (17 mai, 5 h), ou le 18, mais après la pluie sur feuillage sec (390 DH) (7h30), et finalement 560 DH après l'infection initiale (19 h 30).

Produits testés :

Selon l'année de l'essai et la stratégie d'intervention, différents produits et mélanges ont été comparés (tableaux 2 et 5). La concentration des produits a été exprimée en fonction de la formulation commerciale (ml ou g/100 ml ou ppm) dans la solution finale. Les produits à l'essai étaient : Captan Supra 80WDG (United agri products Canada, 80% captan) (750 ppm); Fontelis (Dupont, 20 % penthiopyrad) (535 ppm); Inspire Super (Syngenta, 8.4 % difenoconazole + 24.1 % cyprodinil) (312 ppm);

Aprovia 100EC (Syngenta, 100 g/L Solatenol) (180 ppm); la bouillie sulfo calcique (LLS) (UAP Canada, polysulfure de calcium 30 %) (0,88 % v/v); Kumulus (BASF Canada, 80 % soufre) (0.313 %); bicarbonate de potassium (B2K) au taux d'application normal (0.313 %); B2K à dose réduite (0.25 %); B2K au double de la concentration (0,625 %); B2K (0.313 %) en combinaison avec le Kumulus (0.313 %). Une formulation commerciale de B2K a également été incluse dans l'essai (Scirocco, AEF Global, 85 % B2K) (0.368 %), de sorte que la dose de bicarbonate testée soit la même. Le B2K (0.313 %) a aussi été testé en mélange avec Adhere (Engage Agro, 100 % Pinolene) (250 ppm), ou le Sun Spray Oil 13E (Petro Canada, 99 % huile minérale) (0,5 %). Finalement, la combinaison B2K et Kumulus a également été testée en mélange avec du Surround WP (BASF Canada, 95 % kaolin) (0,625 %) et de concert avec des traitements réguliers d'un éliciteur des mécanismes de défense des plantes à base de phosphonate, soit le Rampart (53.6 % sels de potassium de l'acide phosphoreux) (0,3 %).

Effet du volume de bouillie (gicleurs)

Les traitements en vergers commerciaux avec un pulvérisateur à jet porté sont effectués dans un volume d'eau réduit par rapport aux essais effectués avec un fusil. Ils sont « concentrés » en comparaison aux tests « dilués ». Pour confirmer que les applications en concentré de bicarbonate ont la même efficacité qu'en dilué, nous avons comparé en 2013 et 2014 l'effet de varier le volume de bouillie pour un même moment d'application, la même quantité de matière active à l'hectare et la même technique d'application. Un mélange de bicarbonate de potassium (5 kg/ha) et de soufre (Kumulus, 5 kg/ha) a été appliqué selon les modalités décrites pour l'essai en micro parcelles (200-400 ou 390 DH selon l'année), mais dans un verger adjacent aux microparcelles qui est équipé avec un système de gicleurs fixes dont l'efficacité a été démontrée dans un projet antérieur. Le temps d'application avec les gicleurs a été ajusté pour appliquer 350 L/ha (31 s) ou 1050 L/ha (93 s) selon la bouillie pour obtenir la dose visée à l'hectare. Nous avons observé lors des traitements qu'avec 350 L/ha, des gouttes indépendantes (non coalescentes) se formaient à la surface du feuillage, alors qu'avec 1050 L/ha, les feuilles étaient humectées, mais sans toutefois atteindre le point d'écoulement. Les applications ont été faites sur 4 parcelles de 410 m² par modalité, choisies aléatoirement (total de 8 parcelles).

Observations et analyses

L'incidence de la tavelure, le rendement et la grosseur moyenne des fruits ont été mesurés pour chaque arbre des microparcelles. La tavelure a été observée en juillet en comptant le nombre de feuilles tavelées sur 15 bouquets et 15 pousses par arbre (20 bouquets et 20 pousses en 2014). Les pousses comptaient en moyenne 18 feuilles déployées au moment des observations. Tous les fruits de sections standardisées des arbres ont été cueillis et observés à la fin août. Dans les parcelles avec gicleurs, la tavelure a été évaluée en comptant le nombre de feuilles tavelées sur 20 bouquets par arbre (2 arbres par parcelle) sur 10 pousses (2013) ou 20 pousses (2014) par arbre (4 arbres par parcelle), ainsi que sur environ 200 fruits par parcelle à la récolte. Toutes les analyses ont été faites avec des modèles mixtes avec les blocs comme effet aléatoire principal. L'incidence de la tavelure a été modélisée avec une régression binomiale négative ou une régression de Poisson avec un effet aléatoire par sujet

lorsque nécessaire, pour tenir compte de la surdispersion des données. Les autres paramètres ont été analysés avec des modèles avec erreurs normalement distribuées. Les ratios de vraisemblance selon un test de χ^2 (LRT) et des tests de F conditionnels avec la correction Kenward-Roger (KR) ont été utilisés pour déterminer les facteurs qui contribuaient significativement aux modèles. La statistique-Z de Wald a été calculée pour estimer des contrastes pour certains traitements individuels. Un test de Tukey a été utilisé pour les comparaisons multiples entre traitements.

Effet du pH et de la dureté de l'eau

Au cours de l'hiver 2015, un essai au laboratoire a été réalisé afin de comparer l'effet de la dureté et du pH de l'eau utilisée pour les traitements sur l'efficacité du bicarbonate de potassium. Des échantillons de feuilles tavelées de litière de pommiers ont été placés à l'obscurité, face abaxiale vers le haut, dans des incubateurs à 4°C pendant un maximum de 16 semaines. Pendant l'incubation, les feuilles ont été aspergées et ensuite laissées à sécher quotidiennement selon un cycle horaire de lumière 16:8. Chaque échantillon a ensuite été observé et tous les échantillons avec assez d'ascospores à maturité ont été congelés. Au moment des tests, les feuilles de chaque échantillon ont été placées dans des grillages conçus pour des pièges d'éjection éclairés par des tubes fluorescents et conçus pour la collecte d'un culot d'ascospores dans une fiole de type Eppendorf. Les échantillons ont été remouillés à chaque 20 min pendant 2 heures pour favoriser l'éjection des spores à maturité. Après chaque éjection, les échantillons ont été conservés à 18°C à la noirceur pour favoriser la maturation, mais inhiber l'éjection. Pour chaque jour d'expérience, des ascospores fraîchement éjectées ont été utilisées et resuspendues dans des plaques de 96 puits à raison de 180 ascospores par puits et exposées à 6 doses de bicarbonate en triplicatas pour chaque traitement. Les plaques ont ensuite été incubées sans agitation pendant 16 heures pour favoriser la formation et l'adhésion d'appressoria, et par la suite agitées jusqu'au moment de l'observation, soit 48 heures après inoculation. La méthode du recouvrement linéaire a été utilisée pour estimer la densité mycéliale pour chaque modalité et dans le témoin. La comparaison des inhibitions de croissance par rapport au témoin a été utilisée comme critère d'efficacité. La dose nécessaire de B2K pour l'inhibition de 50 % de la croissance (EC50) a été évaluée pour 6 modalités de dureté d'eau et de pH. L'eau déminéralisée de référence normalement utilisée pour les tests avait une dureté et un pH proche de 0 et 6 respectivement. Nous avons testé l'effet de la dureté de l'eau et du pH en ajoutant, soit 100 ppm de calcium ou de magnésium sous forme de CaCl_2 ou MgCl_2 à l'eau de référence et à de l'eau ajustée initialement à un pH 8,5 avec de l'hydroxide de sodium. Comme le bicarbonate de potassium augmente le pH des solutions, le pH des solutions finales variait selon la concentration de bicarbonate de 6 à 8,5 pour les solutions à base d'eau déminéralisée et étaient à un pH de 8,5 pour toutes les concentrations de bicarbonate réalisées à base d'eau initialement ajustée à un pH de 8,5. La dureté de l'eau n'influçait pas le pH.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Essais en vergers (microparcelles et gicleurs)

Résultats de 2013

Malgré un début de saison sec et une première infection seulement au stade de la floraison, l'accumulation de pluie en mai (110,2 mm) était supérieure à la moyenne 30 ans (77 mm). De plus, les indices de tavelure (RIM) ont totalisé 4816 pour l'année, soit une valeur élevée pour notre climat (tableau 1). Il s'en suit que la pression de tavelure a été élevée en 2013. Les infections tardives ont fait en sorte que les lésions de tavelure n'étaient visibles que sur les feuilles de pousses. Les feuilles de bouquets étaient déjà résistantes lors de la première infection.

Tous les traitements ont réduit l'incidence de la tavelure sur feuilles par rapport au témoin ($p=0,06$) (tableau 2). Pour la stratégie 200-400 DH, le B2K en mélange avec le soufre s'est avéré plus efficace que n'importe quelle autre combinaison ou que le B2K utilisé seul. En comparaison avec les standards commerciaux, le B2K en mélange avec le soufre s'est avéré moins efficace que le Fontelis ou le Inspire Super et son efficacité était similaire à celle obtenue avec la bouillie sulfocalcique (bouillie nantaise, LLS). La dose de 10 kg/ha de B2K (0,613 %) avait un effet similaire sur la tavelure que la dose de 5 kg/ha (0,131 %). Retarder les traitements selon une stratégie de post-infection pour le B2K a eu pour effet de diminuer le nombre de traitements de 10 pour la stratégie 0-200DH, à 7 pour la stratégie 400-600DH, mais a également réduit l'efficacité à réprimer la tavelure. La comparaison entre traitements était similaire pour la tavelure sur fruits. Cependant, la tavelure sur fruits était beaucoup plus fréquente sur les arbres traités avec du B2K seul ou avec les adjuvants autres que le soufre. Les traitements fongicides ont également eu un impact sur le rendement ($p=0,03$). Les arbres traités avec LLS et la plupart des stratégies avec B2K présentaient des rendements supérieurs au témoin. Une analyse de contrastes a révélé que le rendement des arbres traités avec l'une ou l'autre des stratégies avec B2K (9 stratégies) était en moyenne plus élevé que le témoin de 4 kg/arbre ($p=0,015$). De même, les arbres traités avec B2K + Kumulus (5 stratégies) avaient un rendement accru de 2,1 kg/arbre ($p=0,047$) par rapport au rendement des arbres traités avec B2K sans Kumulus (4 stratégies).

L'effet du volume d'application sur l'incidence de la tavelure sur pousses (tableau 3) était non significatif ($\chi^2(1)=0,77$; $p=0,45$). Par contre, le volume d'application a eu un effet significatif sur la tavelure sur fruits, les arbres traités avec 1050 L/ha étaient plus tavelés ($\chi^2(1)=24,4$; $p<0,0001$) que les fruits traités avec 350 L/ha.

Aucun traitement n'a eu d'impact sur la grosseur moyenne des fruits ($p=0,6$), et donc l'effet sur le rendement est entièrement en lien avec le nombre de fruits récoltés. Aucun fruit récolté ne présentait de symptômes de roussissure ou d'une quelconque phytotoxicité.

Résultats de 2014

Comme les traitements ne visaient qu'une infection et que le témoin a été traité comme les autres parcelles pour les autres périodes de pluie, l'incidence de tavelure légèrement plus faible observée en 2014 dans le témoin ne représentait qu'une partie des infections primaires de l'année. L'indice RIM d'estimation de la sévérité de l'infection a dépassé 4000 pour l'infection choisie pour les tests, soit une valeur très élevée, et plus de 39 mm de pluie ont été enregistrés pendant cette infection. La pression de tavelure était donc forte pour cette infection.

Nous avons ciblé une infection majeure avant la sortie des premiers symptômes pour nous assurer que l'infection visée soit seulement liée aux éjections d'ascospores et faciliter l'interprétation des résultats de chacune des stratégies déployées en lien avec cette infection. Par contre, cette approche peut s'avérer problématique quand l'infection n'est pas assez grave pour permettre de dégager des différences entre les traitements. Nous n'avons pas eu ce problème, et donc les résultats sont exploitables. Cependant, le témoin de l'expérience n'a pas été traité pour deux infections, et les comparaisons entre les stratégies et le témoin ne peuvent être faites directement puisque le traitement du 23 mai commun à toutes les stratégies a également contribué à réprimer la tavelure. Les différences observées par rapport au témoin sont donc dues à l'effet combiné des stratégies pour l'infection du 16-17 et du 22-23. Ceci explique du moins en partie pourquoi des traitements comme le Captan en post-infection ont démontré une efficacité par rapport au témoin alors que son effet est normalement marginal dans ces conditions. Néanmoins, les comparaisons entre les stratégies (nonobstant le témoin) restent valides.

Par ailleurs, le faible effet des traitements sur les feuilles des bouquets contrairement à l'effet observé pour les feuilles de la pousse annuelle est une bonne indication que les feuilles de bouquet étaient déjà au moins partiellement résistantes à la fin du stade bouton rose (résistance ontogénique), soit moins d'une semaine après le déploiement des dernières feuilles.

Différents modèles ont été comparés pour modéliser l'effet de l'interaction entre le moment des traitements et la matière active appliquée sur l'incidence de la tavelure (tableau 2). Chacun des modèles a été sélectionné sur la base de l'AIC, des ratios de vraisemblances et une analyse des résidus. Dans tous les cas, les résidus du modèle choisi étaient normalement distribués et ne présentaient pas d'hétéroscédasticité pour les facteurs étudiés. Le moment des traitements, le produit utilisé et l'interaction moment*produit ainsi que l'interaction B2K * Kumulus ont été évalués comme effets fixes des modèles.

Pour la tavelure sur les feuilles de bouquet, une régression de Poisson avec un intercept aléatoire pour le secteur du verger et l'orientation des rangées ont été choisies. Un intercept aléatoire par arbre a été utilisé pour modéliser la surdispersion. L'effet global des traitements sur l'incidence de la tavelure sur bouquet établi avec un ratio de vraisemblance par rapport à un modèle sans traitements était marginal ($p=0.083$) ou même non significatif ($p=0.16$) avec un test de F conditionnel avec la correction Kenward-Roger (KR). Le faible effet des traitements sur la tavelure sur

bouquets s'explique probablement par la résistance partielle des feuilles au moment de l'infection qui a masqué l'effet des traitements. Les valeurs de p approximatives (statistique-Z de Wald) ont néanmoins été rapportées dans le tableau pour illustrer l'effet de chaque traitement par rapport au témoin laissé sans fongicide entre le débourement avancé et la floraison. Une différence au seuil $p=0.05$ a été observée pour tous les produits, à l'exception du B2K traité seul et du Captan appliqué en post-infection dans la fenêtre 200-400DH. Le traitement le plus efficace présentait une réduction de seulement 65 % des symptômes. En excluant le témoin de l'analyse, l'effet des traitements entre eux était similaire, et conséquemment le test de F (KR) favorisait le modèle sans l'effet traitement ($p=0.9$).

Pour la tavelure sur les feuilles de pousse, le nombre de feuilles tavelées était également surdispersé par rapport à une distribution de Poisson et une régression binomiale négative avec un effet aléatoire pour le secteur du verger a été choisie. L'effet des traitements sur la tavelure sur pousse était significatif par rapport au témoin ($F(KR) = 4.34, p<0.0001$) et entre les traitements ($F(KR)=2.86, p=0.001$). Chacun des traitements a réduit la tavelure par rapport au témoin au seuil de $p=0.05$. Le traitement le plus efficace a permis une réduction d'environ 80 % des symptômes.

Comme la dose réduite de B2K (4 kg/ha vs 5 kg/ha) appliqué seul n'a eu aucun impact sur l'incidence de la tavelure en post-infection dans la fenêtre 0-200DH ($\chi^2(1)=0.05, p=0.8$ et $F(KR)=0.6, p=0.5$), les deux traitements ont été poolés pour l'analyse de l'interaction entre l'effet des produits et le moment d'application. De même, les résultats pour les arbres traités avec du Surround ont été intégrés avec le traitement B2K + Kumulus dans l'analyse d'interaction puisque le kaolin n'avait pas d'effet sur la tavelure ($\chi^2(1)=0.05, p=0.8$ et $F(KR)=0.14, p=0.7$). La formulation Sirocco de B2K a réduit l'incidence de la tavelure ($\chi^2(1)=5.9, p=0.015$ et $F(KR)=6, p=0.02$) d'environ 0,8 feuille tavelée par pousse par rapport au B2K technique pour une même dose et le même moment d'application (1.05 feuille avec les moyennes brutes).

Selon la fenêtre d'application, l'effet du Kumulus variait et donc l'interaction Kumulus*Moment était significative ($F(KR)=3, p=0.06$). Le Kumulus était moins efficace lorsqu'appliqué après la fenêtre de germination. De même, l'effet du B2K variait selon les moments d'application et de façon encore plus marquée (B2K*Moment, $F(KR) = 9, p<0.001$). Le B2K seul était plus efficace après la période de germination, mais tôt au cours de l'infection. Par ailleurs, l'efficacité du B2K était modifiée par l'ajout du Kumulus (B2K*Kumulus, $F(KR) = 9, p=0.003$), le mélange étant généralement plus efficace pour tous les moments d'application.

Le Captan en post-infection (0-200 ou 200-400) était moins efficace que pendant la période de germination. L'efficacité du mélange B2K + Kumulus était similaire pour tous les moments d'application ($F(KR)=0.4, p=0.7$), sauf pour la fenêtre 400-600 où l'efficacité était moindre ($t=2.09, \text{statistique-Z} = 0.04$). Comme ce traitement était commun à tous les moments d'application, il a été utilisé pour les comparaisons au sein de chaque moment d'application.

Pendant la période de germination, le B2K seul était le traitement le moins efficace. Le Captan et le Kumulus étaient plus efficaces que le mélange B2K + Kumulus. Au début de l'infection (0-200), le Kumulus seul était moins efficace que le mélange B2K + Kumulus. Plus tard dans l'infection (200-400), le B2K seul était moins efficace que le mélange B2K + Kumulus. Tous les autres traitements appliqués pendant cette période, incluant l'urée, étaient d'efficacité similaire. Dans la fenêtre 400-600, les traitements étaient d'efficacité similaire, mais le Inspire Super s'est avéré plus efficace que le mélange B2K + Kumulus.

La tavelure sur fruits à la récolte était également surdispersée par rapport à une distribution de Poisson et une régression binomiale négative avec un effet aléatoire pour le secteur du verger et l'orientation des rangées a été utilisée pour la modélisation. L'effet des traitements sur la tavelure sur fruits était significatif avec le témoin ($F(KR) = 2.07$, $p=0.01$) et sans témoin ($F(KR)=2.07$, $p=0.01$). Chacun des traitements a réduit la tavelure par rapport au témoin au seuil de $p=0.05$. Le traitement le plus efficace présentait une réduction d'environ 80 % des symptômes.

Comme pour la tavelure sur pousses, la réduction de la dose de B2K (4kg/ha vs 5kg/ha) en post-infection 0-200 DH n'a eu aucun impact sur l'incidence de la tavelure sur fruits ($\chi^2(1)=0.4$, $p=0.55$) et les deux traitements ont été poolés pour les analyses d'interaction entre l'effet des produits et le moment d'application. De même, pour les arbres traités au kaolin ($\chi^2(1)=0.01$, $p=0.9$). La formulation Sirocco de B2K a réduit l'incidence de la tavelure sur fruits ($\chi^2(1)=14$, $p<0.001$) par rapport au bicarbonate technique.

Les interactions entre le B2K, le Kumulus et le moment d'application pour la tavelure sur fruits étaient différentes de celles observées pour la tavelure sur pousses. Selon la fenêtre d'application, les interactions Kumulus*Moment n'étaient pas significatives ($F(KR)=0.1$, $p=0.9$). De même, l'effet du B2K ne variait pas selon les moments d'application (B2K*Moment, $F(KR) = 0.9$, $p=0.4$), les différences d'efficacité étant moindres que sur les pousses. Néanmoins, l'efficacité du B2K était modifiée par l'ajout du Kumulus (B2K*Kumulus, $F(KR) = 5$, $p=0.03$) et comme pour la tavelure sur pousses, l'ajout de Kumulus améliorait l'efficacité du B2K. Le Captan avait la même efficacité pour la tavelure sur fruits pour toutes les fenêtres de traitement ($F(KR)=.5$, $p=0.71$), de même que le mélange B2K + Kumulus ($F(KR)=1$, $p=0.4$). Pendant la période de germination, le B2K était moins efficace que le Captan ou le Kumulus. Au début de l'infection (0-200), les traitements avaient une efficacité similaire. Plus tard dans l'infection (200-400), le B2K seul, le Kumulus seul et le LLS étaient moins efficaces que le mélange B2K + Kumulus. Dans la fenêtre 400-600, tous les traitements avec des produits synthétiques se sont avérés plus efficaces que le mélange B2K + Kumulus .

Un modèle linéaire mixte simple avec erreur normale a été utilisé pour modéliser l'effet des traitements sur le rendement et la grosseur des fruits. Les traitements n'ont pas eu d'effet sur les rendements à la récolte ($F(KR)=0.8$, $p=0.67$) ou la dimension des fruits ($F(KR)=0.86$, $p=0.65$).

L'effet du volume d'application sur l'incidence de la tavelure sur bouquets (tableau 6) était non significatif ($\chi^2(1)=0,77$, $p=0,38$), mais significatif sur pousses ($\chi^2(1)=18,9$, $p<0.0001$) et sur fruits ($\chi^2(1)=24,5$, $p<0.0001$). Les parcelles traitées avec 1050 L/ha étaient plus tavelées que les parcelles traitées avec 350 L/ha.

Effet du pH et de la dureté de l'eau

Pour les 6 modalités de pH et de dureté, nous avons observé une relation dose-réponse pour le bicarbonate de potassium (figure 1). La croissance après 48h diminuait à mesure que la concentration de bicarbonate était augmentée. La croissance du champignon dans le témoin était plus 2,9 x grande à pH = 6 (bleu) qu'à pH = 8,5. ($p<0.0001$). La dureté n'avait pas d'effet sur la croissance en l'absence de bicarbonate ($p=0,31$). Une fois ajustée pour le pH initial, la croissance du champignon en présence du bicarbonate n'était pas affectée par la dureté de l'eau ou le pH ($p=0,095$).

Discussion

L'expérience de 2014 a permis de confirmer que le bicarbonate utilisé seul n'a pas d'effet lorsqu'appliqué pendant la fenêtre de germination. Les données suggèrent en fait que le B2K a même pu nuire à l'efficacité du Kumulus pendant cette période. Pendant la germination, nos résultats confirment que le Captan ou le Kumulus utilisé seul sont plus efficaces. Une fois l'infection déclarée (0-200), notre expérience confirme que le Kumulus perd son efficacité et que le B2K ou le mélange B2K + Kumulus est favorisé. La dose de B2K préconisée en Europe (5kg/ha) semble laisser une marge de manœuvre puisque les résultats avec 4kg/ha (2014) étaient similaires pour tous les paramètres mesurés. Cette observation devra cependant être confirmée. Plus tard au cours de l'infection (200-400), le mélange B2K+Kumulus s'est avéré plus efficace pour tous les paramètres mesurés que le B2K utilisé seul. Notre expérience confirme donc la synergie de ce mélange. La formulation Sirocco de B2K avait un effet similaire à ce mélange. Par ailleurs, même si l'efficacité du Captan diminuait en post-infection, son effet était similaire au mélange B2K + Kumulus. Le LLS a été inclus dans l'essai parce que son efficacité est souvent comparée à celle du mélange B2K + Kumulus, mais contrairement à nos résultats antérieurs, le LLS a été moins efficace, notamment pour la tavelure sur fruits. Finalement, l'urée seule s'est avérée aussi efficace que B2K + Kumulus, et il serait intéressant de confirmer ces résultats. À notre connaissance, c'est la première fois que l'efficacité de l'urée foliaire a été démontrée pour lutter contre la tavelure pendant la saison des infections primaires.

Pour les deux années de l'expérience, les fongicides de synthèses étaient généralement plus efficaces que le B2K + Kumulus, notamment pour réduire la tavelure sur fruits (2014). Le Captan et le Sirocco n'ont pas été testés pour la fenêtre 400-600, mais il aurait été intéressant de déterminer si la baisse d'efficacité observée pour le B2K + Kumulus aurait été similaire pour ces produits. La baisse d'efficacité du B2K + Kumulus observée sur feuillage pour la fenêtre 400-600 n'était pas significative sur fruits, mais la tendance observée reste la même.

Contrairement à 2013, les traitements fongicides n'ont pas eu d'impact sur le rendement. Il est possible que l'accumulation de plusieurs traitements ait pu jouer un rôle sur la nouaison, mais comme les stratégies étaient appliquées avant la fleur en 2014, cet effet n'a pas pu être observé.

Pour les deux années, nous avons constaté qu'augmenter le volume de bouillie diminuait l'efficacité du bicarbonate pour une même dose de matière active à l'hectare.

Finalement, certains observateurs européens ont émis l'hypothèse que le pH et la teneur en calcium de l'eau utilisée pour les traitements en verger avaient une influence notable sur l'efficacité du bicarbonate à réprimer la tavelure. Nos essais in vitro avec une dureté à 100 ppm n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse. Il est possible que l'effet présumé soit en lien avec la formulation de bicarbonate ou qu'il résulte d'une interaction imprévisible avec la plante. Notre essai confirme cependant que la croissance de *Venturia inaequalis* comme plusieurs autres champignons est inhibée par les pH élevés, et donc l'effet du pH sur la croissance du champignon était attendu. Néanmoins, cette expérience a permis de démontrer que l'inhibition de croissance liée au bicarbonate n'est pas seulement liée au pH.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE ET/OU SUIVI À DONNER

Le projet de 2 ans avait pour but de tester une vaste gamme de conditions d'utilisation du B2K avant l'homologation et ces objectifs ont été largement atteints. Néanmoins, différentes questions ont été soulevées en cours de projet et certains nouveaux résultats obtenus requièrent une confirmation. Par exemple, l'efficacité supérieure de la formulation Sirocco par rapport au B2K technique était inattendue puisque des formulations similaires s'étaient avérées décevantes en Europe et donc exclues du projet. De même, nous aimerions confirmer que le B2K utilisé seul n'est temporairement efficace qu'au début de l'infection sur feuillage mouillé et ainsi conscientiser les producteurs que toute autre utilisation nécessite de mélanger avec du soufre. Finalement, il serait intéressant de confirmer que les effets du B2K et du soufre observés sur les rendements en 2013 sont bien en lien avec un usage intensif de ces produits.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Nom du responsable du projet : Vincent PHILION

Téléphone :514-623-8275

Courriel :vincent.philion@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

L'équipe de réalisation du projet tient à remercier le programme Prime-Vert, sous-volet 11.1- Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture avec une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et l'IRDA pour leur soutien financier, sans lequel le projet n'aurait pu se concrétiser.

ANNEXE(S)

Tableau 1. Moment des applications des différentes stratégies de traitements fongicides (micro parcelles et gicleurs) en relation avec les conditions climatiques et les risques de tavelure calculés selon le simulateur RIMpro pour la saison 2013 à Saint-Bruno-de-Montarville.

	Mai ^z															Juin													
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	1	2	6	7	8	9	10	11	12
Phénologie:	Floraison					Calice																							
Pluie (mm):	1	0,1	13	x	0,4	x	4,6	0,1	x	1,1	5,7	4,7	5,1	15,3	13,6	23	8,1	x	14,3	0,1	19	x	5,6	7,7	3,5	x	0,2	37	0,9
RIM ^y :	x	x	434	x	x	x	578	x	x	766	220	2700					x	47	x	2	x	230	x	59					
Traitements (DH):																													
0-200	a ^x					d					g					j		m		o		p		s		v		y	
200-400	b					e					h					k		n		r		t		w		z			
400-600	c					f					i					l		q		u		x							

^z Seules les dates avec pluie ou avec traitement ont été rapportées dans le tableau.

^y Indice de sévérité de la tavelure pour chaque période d'infection selon RIMpro. « x » en absence d'infection.

^x Moment des applications des différents produits pour chaque stratégie de traitements

Tableau 2. Effet des différentes stratégies de traitements fongicides sur l'incidence de la tavelure et le rendement des pommiers en micro parcelles en 2013

Traitement	Feuilles tavelées par pousse ^z	Tavelure sur fruits (%) ^y	Rendement (kg/arbre) ^x	Poids moyen des fruits (g) ^w
Témoin	7,7 g ^v p= ^u	87,8 e p=	9,1 a p=	108 NS
0-200 DH (a,d,g,j,m,o,p,s,v,y)				
B2K + Kumulus.....	1,9 c ***	2,2 a ***	13,8 ab **	124
200-400 DH (b,e,h,k,n,r,t,w,z)				
B2K + Kumulus.....	2,4 ce ***	5,5 a ***	14,8 b **	124
B2K.....	5,9 fg .	54,2 cd ***	11,3 ab *	121
B2K (0,613%).....	4,6 f ***	35,3 c ***	12,6 ab **	123
B2K + Adhere.....	5,5 fg *	61,4 de **	12,0 ab .	113
B2K + SunSpray	4,1 ef ***	51,7 cd ***	10,5 ab NS	123
B2K + Kumulus + Surround.....	2,6 ce ***	5,0 a ***	13,1 ab *	125
B2K + Kumulus & Rampart ^t	1,5 bc ***	2,2 a ***	14,7 ab **	123
LLS	2,1 cd ***	4,5 a ***	14,7 b ***	131
Fontelis	0,8 ab ***	3,9 a ***	12,5 ab *	122
Inspire Super	0,7 a ***	0,7 a ***	8,7 ab NS	123
400-600 DH (c,f,i,l,q,u,x)				
B2K + Kumulus.....	3,9 def ***	20,0 b ***	13,3 ab **	128

^znombre moyen de feuilles tavelées par pousse (15 pousses par arbre)

^yPourcentage moyen de fruits tavelés

^xMoyenne des rendements par arbre

^wMoyenne des grosseurs de fruits par arbre

^vLes nombres d'une même colonne suivis par la même lettre ne sont pas différents au seuil de signification p=0.05, selon un test de Tukey

^uProbabilité que les valeurs ne soient pas différentes du témoin selon la statistique-Z de Wald, ***<0,001;

**<0,01; *<0,05; .<0,1; NS >0,1).

^tRampart appliqué 8 Mai, 16 Mai, 21 Mai, 27 Mai et 6 juin.

Tableau 3, Effet du volume de bouillie lors de l'application avec des gicleurs du mélange de bicarbonate de potassium (5 kg/ha) et de soufre (5 kg/ha) sur l'incidence de la tavelure en verger (2013)

Traitement	Feuilles tavelées par pousse ^z	Tavelure sur fruits (%) ^y	Poids moyen des fruits (g) ^x
200-400DH (b,e,h,k,n,r,t,w,z)			
350 l/ha.....	1,78	5,0	140
1050 l/ha	1,53 NS ^w	12,1 ***	133 NS

^znombre moyen de feuilles tavelées par pousse (10 pousses par arbre et 2 arbres par parcelle)

^yPourcentage moyen de fruits tavelés (environ 200 fruits par parcelle)

^xMoyenne des grosseurs de fruits par arbre

^wProbabilité que les valeurs ne soient pas différentes selon LRT (χ^2), ***<0,001; **<0,01; *<0,05; .<0,1; NS >0,1).

Tableau 4. Moment des applications des différentes stratégies de fongicides en relation avec les conditions climatiques et les risques de tavelure calculés selon le simulateur RIMpro pour toute la saison des infections primaires à Saint-Bruno-de-Montarville (2014)

	Mai ^z															
	1	2	3	4	5	6	9	10	14	16	17	18	22	23	25	26
Phénologie	Débourrement						Débourrement avancé		Pré bouton rose	Bouton rose		Bouton rose avancé	Pleine floraison		Chute des pétales	
Temp moy (°C)	10,6	10,9	11,1	8,6	9,2	9	14,7	18,7	19,2	19,8	11,9	12,1	15,1	15	17,8	18,9
pluie (mm):	10,4	0,3	4,8	15,3	0,5	0	0,3	5,7	0,3	8,5	30,6	0	5	0	0,6	1,6
RIM ^y	526		x		727	x	x	10	x	4126		x	1495		x	x
Traitements :																
Témoin	Cu ^x				B2K										P	
Germination	Cu				B2K				a 21h00				B2K+S		P	
100 DH	Cu				B2K				b 5h00				B2K+S		P	
390 DH	Cu				B2K						c 7h30		B2K+S		P	
560 DH	Cu				B2K						d 19h30		B2K+S		P	

^z Seules les dates avec pluie ou avec traitement ont été rapportées dans le tableau.

^y Indice de sévérité de la tavelure pour chaque période d'infection selon RIMpro. « x » en absence d'infection.

^xCu, B2K, P: Traitements appliqués dans toutes les parcelles. (Cu = Cuivre fixe, B2K = bicarbonate de potassium, Penncozeb)

a,b,c,d : Moment des applications des différents produits pour chaque stratégie de traitements
B2K + S : Bicarbonate de potassium + Kumulus appliqué sur toutes les parcelles à l'exception du témoin

Tableau 5. Effet des différentes stratégies fongicides sur l'incidence de la tavelure et le rendement des pommiers en micro parcelles (2014)

Traitement	Feuilles tavelées par bouquet ^z		Feuilles tavelées par pousse ^z		Tavelure sur fruits (%) ^y		Rendement (kg/arbre) ^x	Poids moyen des fruits (g) ^w	
Témoin	0,60	p= ^u	4,08	p=	18,7	p=	18,9 a	p=	141 a
Germination (a)									
B2K	0,39	**	3,56 ^v	b** **	16,1 b	*	19,5 a		141 a
B2K + Kumulus.....	0,28	***	1,66 a	***	6,2 ab	***	18,1 a		132 a
Kumulus.....	0,24	**	0,72 a*	***	4,0 a	***	24,0 a		130 a
Captan.....	0,31	**	1,15 a*	***	4,8 a	***	14,9 a		143 a
0-200DH (b)									
B2K(0,25%).....	0,26	**	1,61 a	***	8,5 a	*	19,8 a		149 a
B2K	0,34	**	2,02 a	***	11,8 a	**	18,5 a		134 a
B2K + Kumulus.....	0,38	**	2,09 ab	***	6,0 a	***	18,3 a		128 a
Kumulus.....	0,35	***	3,90 b*	*	7,7 a	***	17,6 a		129 a
Captan.....	0,29	***	2,30 ab	***	7,4 a	***	21,7 a		137 a
200-400DH (c)									
Sirocco.....	0,25	***	1,84 a	***	5,1 a	***	19,2 a		127 a
B2K	0,51		2,89 b**	*	11,4 a*	*	19,1 a		129 a
B2K + Kumulus.....	0,38	**	1,77 ab	***	6,1 a	***	16,2 a		125 a
B2K + Kumulus + Surround..			1,95 ab	***	6,3 a	***	14,0 a		142 a
Kumulus.....	0,44	*	2,74 b	**	9,9 a*	***	24,0 a		143 a
Captan.....	0,38		1,82 ab	***	6,6 a	**	23,0 a		139 a
LLS	0,40	*	2,75 ab	***	10,8 a*	*	23,0 a		132 a
Urée	0,21	**	2,35 b	*	4,7 a	***	20,1 a		136 a
400-600DH (d)									
B2K + Kumulus.....	0,41	**	3,01 a	**	9,9 b	***	23,4 a		133 a
Fontelis	0,38	**	2,34 a	***	6,3 ab*	***	19,9 a		126 a
Inspire Super.....	0,25	***	1,75 a*	***	5,0 a***	***	17,8 a		140 a
Aprovia.....	0,26	***	1,84 a	***	4,3 a***	***	20,1 a		129 a

^znombre moyen de feuilles tavelées par bouquet ou par pousse (20 bouquets et 20 pousses observés par arbre).

^yPourcentage moyen de fruits tavelés (moyenne par arbre)

^xMoyenne brute des rendements par arbre.

^wDimension moyenne des fruits par arbre

^vLes nombres d'une colonne au sein d'une stratégie de traitement qui sont suivis par la même lettre ne sont pas différents au seuil de signification $p=0,05$, selon un test de comparaisons multiples de Tukey. La probabilité que les valeurs ne soient pas différentes du B2K + Kumulus pour cette stratégie sont également rapportés (selon la statistique-Z de Wald, ***<0,001; **<0,01;*<0,05).

^uNonobstant l'effet global des traitements, probabilité que les valeurs ne soient pas différentes du témoin selon la statistique-Z de Wald (***<0,001; **<0,01;*<0,05)

Tableau 6. Effet du volume de bouillie lors de l'application avec des gicleurs du mélange de bicarbonate de potassium (5 kg/ha) et de soufre (5 kg/ha) sur l'incidence de la tavelure en verger (2014)

Traitement	Feuilles tavelées par bouquet ^z	Feuilles tavelées par pousse ^z	Tavelure sur fruits (%) ^y	Poids moyen des fruits (g) ^w
200-400DH (c)				
350 l/ha.....	0,55	1,48	5,0	140 a
1050 l/ha	0,62 p=0,38	2,14 p<0.001	12,1 p<0.001	133 a

^znombre moyen de feuilles tavelées par bouquet ou par pousse (20 bouquets par arbre et 2 arbres par parcelle, 20 pousses par arbre, 4 arbres par parcelle)

^yPourcentage moyen de fruits tavelés (moyenne par arbre)

^xMoyenne brute des rendements par arbre.

^wDimension moyenne des fruits par arbre

^vLes nombres d'une colonne au sein d'une stratégie de traitement qui sont suivis par la même lettre ne sont pas différents au seuil de signification $p=0.05$, selon un test de comparaisons multiples de Tukey. La probabilité que les valeurs ne soient pas différentes du B2K + Kumulus sont également rapportés (selon la statistique-Z de Wald, $***<0,001$; $**<0,01$; $*<0,05$).

^uNonobstant l'effet global des traitements, probabilité que les valeurs ne soient pas différentes du témoin selon la statistique-Z de Wald ($***<0,001$; $**<0,01$; $*<0,05$)

Figure 1. Indice de croissance du mycelium de *Venturia inaequalis* in vitro dans l'eau déminéralisée ou en présence de 100 ppm de calcium ou de magnésium en fonction de la concentration de bicarbonate de potassium. pH initial de 6 (bleu) ou 8,5 (rose).

