

Table des matières

Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	viii
Remerciements.....	x
Avant-propos	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : État des connaissances	2
1.1 Les Tetranychidae	3
1.1.2 Les tétranyques dans les framboisières.....	6
1.1.3 Les moyens de lutte contre les tétranyques.....	7
1.2 Les Phytoseiidae	9
1.2.1 Biologie des phytoséiides.....	10
1.2.3 Régime alimentaire (type de prédation)	15
1.2.4 Utilisation en lutte biologique.....	17
1.3 Suppléments nutritifs	19
1.3.1 Rôle du pollen dans la lutte biologique avec phytoséiides	19
1.4 Plantes-réservoirs.....	22
1.4.1 Utilisation de plantes-réservoirs en lutte biologique	22
1.4.2 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	23
1.5 Brumisation.....	25
1.5.1 Utilisation en serres.....	25
1.5.2 Utilisation en lutte biologique.....	25
1.5.3 Performance des framboisiers	26
1.6 Culture du framboisier	26
1.6.1 Framboisiers non-remontants	27
1.6.2 Framboisiers remontants	27
1.6.3 Principaux ravageurs et maladies des framboisières	29
1.6.4 Culture de framboisiers sous grands tunnels	31
1.7 Problématique	32
1.8 Objectifs et hypothèses de recherche	34
1.8.1 Objectif général	34

1.8.2 Objectif spécifique 1	34
1.8.3 Objectif spécifique 2	34
1.9 Approche méthodologique.....	34
Chapitre II: Potential and cost of a pollen supplement, a banker plant and misting for enhancing biological control of <i>Tetranychus urticae</i> with <i>Neoseiulus fallacis</i> in high tunnel raspberry production in Quebec, Canada	37
Résumé	39
Abstract	41
Introduction.....	42
Materials and methods	44
Experiment setting	44
2014 experiment	45
2015 experiment	46
Results	48
2014 experiment	48
2015 experiment	49
Discussion	51
Phytoseiid mite introductions	51
Food supplement	52
Banker plant.....	54
Misting.....	55
Acknowledgements	57
References	57
Appendices.....	67
Chapitre III : Conclusion générale.....	74
Bibliographie.....	82

Liste des tableaux

Tableau 1. Principaux acaricides homologués dans la framboise	8
Table 2. Estimated costs for treatments in 2014 at Pouliot farm.....	69
Table 3. ANOVA table from analysis of the TSSM population in 2015 for both farms combined.....	70
Table 4. Estimated costs of treatments in 2015 for both farms combined	73

Liste des figures

Figure 1. Pièces buccales de <i>Tetranychus urticae</i> (palpes, stylophore et stylets).....	4
Figure 2. Dommages occasionnés par <i>T. urticae</i> sur des framboisiers : a) apparition des taches chlorotiques et b) toiles et bronzage sur feuilles	7
Figure 3. Cycle de production du framboisier non-remontant	27
Figure 4. Cycle de production du framboisier remontant	28
Figure 5. Population evolution of (a) <i>T. urticae</i> and (b) phytoseiid mites per leaflet among treatments in 2014 at Pouliot farm.....	68
Figure 6. Average populations of <i>Tetranychus urticae</i> , <i>Neoseiulus fallacis</i> and <i>Phytoseiulus persimilis</i> of all treatments in 2014 at Pouliot farm.	69
Figure 7. Average number of <i>Tetranychus urticae</i> motiles per leaflet with and without misting in 2015 for both growers combined.....	70
Figure 8. Population evolution of (a) <i>Tetranychus urticae</i> and (b) phytoseiid mites per leaflet among treatments in 2015 for both farms combined	71
Figure 9. Average temperatures and relative humidity without misting, with misting and outside the tunnels between 10 a.m. and 4 p.m. in August 2015 at Pouliot farm	72
Figure 10. Average temperatures and relative humidity without misting, with misting and outside the tunnels between 10 a.m. and 4 p.m. in August 2015 at Demers farm.....	72
Figure 11. Total of raspberries harvested between September 10 and 21, with and without <i>Botrytis cinerea</i> at Demers farm in 2015	73

À Achille, à Armand

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Valérie Fournier, ma directrice, de m'avoir offert la chance de réaliser cette aventure qu'est la maîtrise. J'ai toujours pu compter sur ton soutien et ta disponibilité, même à distance, au cours de ces deux longues années qui, finalement, ont passées à toute vitesse. Je remercie également Stéphanie Tellier, ma codirectrice, pour tes conseils et pour avoir partagé avec moi ton expérience et ton professionnalisme. Vous m'avez fourni toutes deux un modèle professionnel que je tenterai de reproduire tout au long de ma carrière.

Un merci spécial à Jenny Leblanc, collaboratrice au projet. Ton appui, tes conseils, ta présence et ta jovialité ont fait une différence durant ces deux années.

Je remercie Vincent Pereboom et Caroline Vouligny des Productions horticoles Demers ainsi que Marine Marel, Valérie Bernier-English et Daniel Pouliot de la ferme Onésime-Pouliot. Je vous suis reconnaissante pour votre coopération, votre soutien et votre confiance.

Je remercie aussi Dr Annabelle Firleij (IRDA) et Dr Eric Lucas (UQAM) pour avoir accepté d'évaluer mon mémoire. Vos commentaires constructifs ont contribué à en améliorer le contenu.

Merci à mes collègues et amis Amélie Gervais, Ségolène Maucourt, Phanie Bonneau et Olivier Samson-Robert. Le partage de nos craintes, frustrations et rires, autour d'un binoculaire, d'un écran ou d'une pinte m'est cher.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé au cours des deux dernières : Noémie Brisson, Jérôme Ouellet, Sandra Savard et Stéphane Thibault. J'ai pu vous accorder toute ma confiance pour ce projet qui me tenait tant à cœur. Merci à Gaétan Daigle, pour sa patience et sa vulgarisation des statistiques, que je déteste tant.

Merci à mes parents. Vous m'avez toujours supporté. Je vous suis reconnaissante d'avoir agi comme mes plus grands fans, même si parfois ce n'était pas approprié. J'ai toujours ressenti votre fierté envers moi et ça m'a aidé à avoir confiance en mes capacités.

En terminant, merci à Pascal Bussières, mon amoureux. Tu m'as toujours appuyé dans ma démarche de retour aux études et encouragé dans mes moments de faiblesse. Merci pour ta patience, ta compréhension et ton aide.

Rapport-Gratuit.com

Avant-propos

Le chapitre II de ce mémoire se présente sous forme d'article scientifique rédigé en anglais. Une version modifiée de ce chapitre sera soumise pour publication dans le journal scientifique *Biocontrol*.

La récolte des données, l'analyse des résultats ainsi que la rédaction de l'ensemble des textes sont issues de la candidate. Valérie Fournier (directrice), Ph.D., professeure d'entomologie à l'Université Laval et Stéphanie Tellier (codirectrice), agr., M.Sc., conseillère régionale en horticulture et en agriculture biologique au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) ont collaboré aux textes et sont coauteures du chapitre II.

Introduction générale

Depuis quelques années, l'utilisation de grands tunnels pour la production maraîchère et fruitière est devenue une pratique bien connue. La culture de framboisiers sous grands tunnels est une régie qui gagne en popularité chez les producteurs de petits fruits nord-américains. Cette approche garantit un rendement et une qualité des fruits supérieurs par la diminution de l'incidence des maladies, principalement en éliminant la mouillure des fruits associée aux précipitations et en allongeant la saison de croissance lorsque comparée à une conduite traditionnelle en champs (Demchak et Hanson, 2013).

Cependant, il n'y a pas que des avantages à la culture sous grands tunnels. Les tétranyques y trouvent en effet un milieu idéal pour leur développement (Lemaire, 2012). Ce type d'exploitation favorise en effet le développement des tétranyques à deux points, *Tetranychus urticae* Koch, en créant un environnement plus chaud et plus sec qu'en champ. Bien que quelques acaricides soient homologués contre le tétranyque à deux points, leur utilisation répétée jumelée au taux de génération élevée de l'acarien ravageur pourrait favoriser une éventuelle résistance à ces pesticides. De plus, les divers délais avant récolte des acaricides homologués peuvent parfois limiter les interventions. Finalement, certains acaricides ne peuvent être appliqués qu'une seule fois par saison de culture. Il y a donc une nécessité de développer des stratégies de lutte alternatives efficaces. Dans un objectif de diminuer l'utilisation des pesticides, la lutte biologique demeure une avenue prometteuse.

Les objectifs de cette étude étaient de développer une méthode de lutte intégrée performante contre les tétranyques en framboisières sous grands tunnels, de diminuer l'usage des pesticides et de diminuer les coûts associés à la lutte biologique contre ceux-ci. Ce projet de recherche avait aussi pour but de tester, dans un premier temps, l'efficacité d'un supplément nutritif pour acariens prédateurs, jumelé à un système de plantes-réservoirs. Par la suite, l'action de ce même supplément nutritif combiné à la brumisation a été étudiée. L'évaluation des coûts associés à l'utilisation de ces techniques était également primordiale, afin de rendre ces approches intéressantes et accessibles pour les producteurs.

Chapitre I : État des connaissances

1.1 Les Tetranychidae

Certains acariens de la famille des Tetranychidae figurent parmi les acariens phytophages les plus importants en agriculture (Hoy, 2011a; Jeppson et al., 1975; Navajas, 1998). On retrouve *Tetranychus urticae* Koch, le tétranyque à deux points, dans toutes les parties du globe et il s'attaque à de nombreuses cultures, autant maraîchères, fruitières, qu'ornementales. Il s'alimenterait en effet sur plus de 1100 plantes hôtes, dont près de 150 qui sont d'importance économique (Ferreira et al., 2015; Yorulmaz Salman et Saritaş, 2014).

1.1.1 Biologie de *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae)

1.1.1.1 Morphologie

Les tétranyques mâles ont un corps allongé, voire triangulaire, et sont plus petits que les femelles. Ces dernières sont plutôt ovales et mesurent environ 0,5 mm. Tous deux sont de couleur jaunâtre avec deux taches dorsales foncées et symétriques, une de chaque côté du corps. Les œufs de tétranyques ont un diamètre de 0,14 mm, sont sphériques et blancs. La larve qui en est issue a trois paires de pattes et est blanche. Les autres stades mobiles ont quatre paires de pattes. Chez tous les membres de la super-famille des Tetranychoidae, dont les tétranyques font partie, le gnathosoma (partie antérieure du corps portant les pièces buccales) comporte des palpes sensoriels ainsi qu'un stylophore (Helle et Sabelis, 1985a). Les palpes contiennent des récepteurs sensoriels ainsi que les glandes à soie, chez les espèces productrices, tandis que le stylophore est rétractable et les stylets chélicéraux y sont insérés (Helle et Sabelis, 1985a) (Figure1). Tous les tétranyques sont phytophages, leurs chélicères modifiées en forme de stylets permettent de perforer et d'aspirer le contenu des cellules végétales (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a; Jeppson et al., 1975). Le nom anglais de la sous-famille des Tetranychidae, « spider mites », fait référence au fait que ces tétranyques produisent de la soie, semblable à celle des araignées, grâce à des glandes qui se situent sur leurs pédipalpes (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a). Les soies, tissées d'abord sous les feuilles puis sur les têtes des tiges des plantes, selon la progression de l'infestation, ont plusieurs fonctions. En premier lieu, elles servent d'abri aux tétranyques en les protégeant des prédateurs ainsi que des conditions climatiques. En effet, les « toiles » préviendraient autant la dessiccation des tétranyques, en cas de temps très sec, qu'elles les protégeraient en cas de fortes pluies. Les toiles tissées sous les feuilles peuvent aussi

servir d'ancrage aux tétanyques lors de leurs stades quiescents (Helle et Sabelis, 1985a; Jeppson et al., 1975). De plus, la présence des toiles de soie réduirait la pénétration des acaricides lors des pulvérisations (Hoy, 2011a). Alors que certains prédateurs phytoséiides évitent les toiles des tétanyques, d'autres s'en servent plutôt comme indice pour trouver leurs proies plus facilement (Hoy, 2011a).

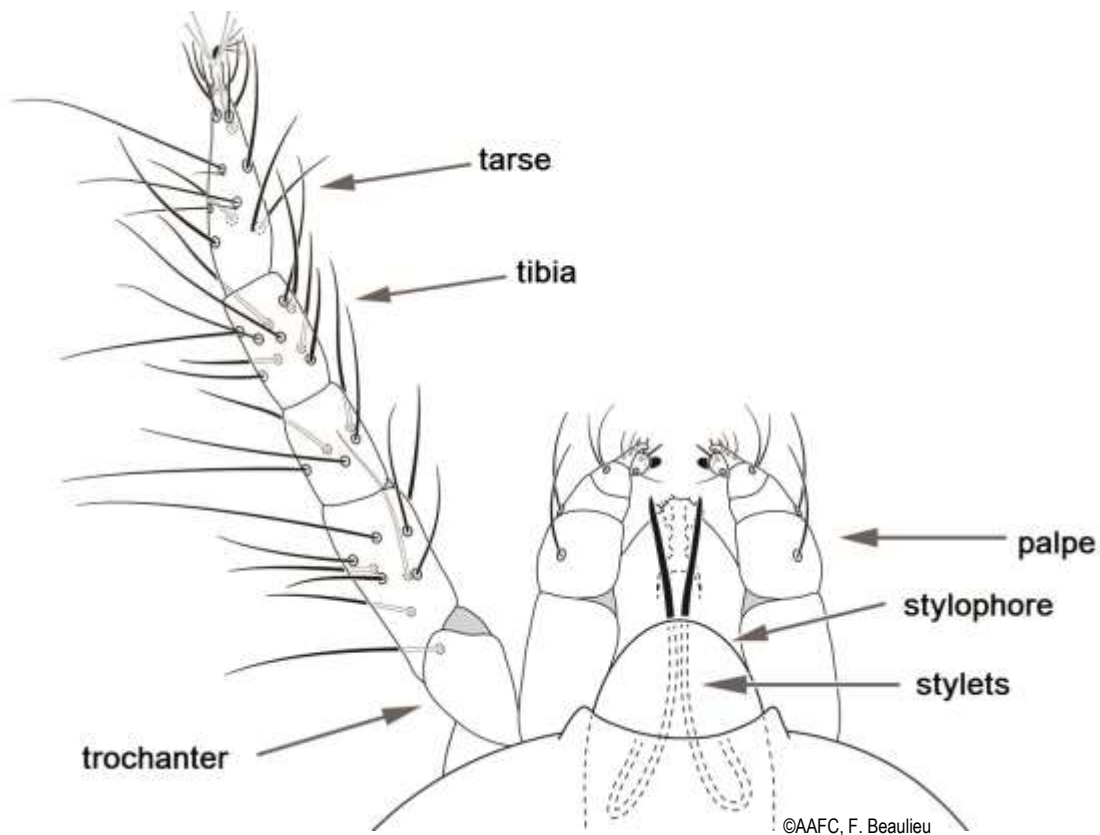


Figure 1. Pièces buccales de *Tetranychus urticae* (palpes, stylophore et stylets). Image modifiée de Beaulieu et al., 2014.

1.1.1.2 Cycle de vie

Les tétanyques à deux points ont cinq stades de développement : œuf, larve à six pattes, protonympe, deutonympe et adulte. La proto-, deuto- et téliochrysalide sont des périodes inactives de quiescence associées à chacun des changements de stade des formes mobiles (Helle et Sabelis, 1985a; Jeppson et al., 1975; Roy et al., 2002). La fenêtre de températures associée au développement des tétanyques à deux points se situe entre 12 et 40°C, avec un optimum à 30-32°C (Jeppson et al., 1975). Pour la majorité des Tetranychidae, la température optimale se situe entre 24 et 29°C (Helle et Sabelis, 1985a). Le temps de développement complet, de l'œuf à adulte, est donc inversement

proportionnel à la température. Par exemple, *Tetranychus mcdanieli* McGregor aura besoin d'un peu plus de huit jours pour compléter un cycle d'œuf à œuf à 35°C comparativement à près de soixante-deux jours à une température de 10°C (Helle et Sabelis, 1985a). L'humidité relative (HR) a aussi un rôle important dans le développement des tétranyques. *Tetranychus urticae* produit davantage d'œufs et se développe plus rapidement sous des conditions d'humidité relative faible (25-30%) comparé à une humidité élevée (85-90%) (Helle et Sabelis, 1985a).

La femelle *T. urticae* vit en moyenne de sept à dix jours et elle produira environ 200 œufs durant cette période (Hoy, 2011a; Jeppson et al., 1975). Le tétranyque se développe généralement sur la feuille où l'œuf duquel il a émergé a été déposé. Toutefois, advenant que la population devienne trop grande ou que la qualité de la plante hôte se dégrade, les tétranyques (en majorité des femelles) s'agrègeront au sommet de la plante afin de se disperser de manière aérienne (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a). Après avoir été fécondées, les femelles vivent une période de pré-oviposition d'environ 24 heures. C'est durant cette période qu'elles auront tendance à se disperser, soit en marchant ou par mouvements aériens (Hoy, 2011a). *Tetranychus urticae* est une espèce arrhénotoque : les femelles gravides déposeront des œufs, fertilisés ou non, donnant respectivement des femelles ou des mâles. Le sex-ratio est généralement de trois femelles diploïdes pour un mâle haploïde (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a). Les mâles se développent plus rapidement que les femelles et il n'est pas rare de voir ceux-ci faire du gardiennage ou « guarding » en anglais, avec leurs sœurs encore au stade téléochrysalide pour s'accoupler avec elles dès qu'elles auront mué en adulte (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a; Jeppson et al., 1975).

La diapause est un moment d'arrêt dans le cycle « œuf à adulte » qui est induit lorsque les conditions deviennent inadéquates au développement. Cet état survient avec la baisse de la photopériode, des températures et de la qualité nutritionnelle de la plante hôte et permet aux tétranyques de survivre à l'hiver. Lorsque les journées raccourcissent, la couleur des femelles *T. urticae* passe du beige verdâtre à l'orange vif et elles cessent de s'alimenter et de pondre. Ce sont ces femelles qui, une fois fécondées, quittent les plantes-hôtes pour aller hiberner dans les résidus végétaux, crevasses ou autres endroits protégés (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a; Jeppson et al., 1975). Les femelles hibernantes peuvent survivent à des températures aussi basses que -27°C (Helle et Sabelis, 1985a). Au Québec, les femelles émergent de leur site d'hibernation au printemps

suisant et commencent l'oviposition dès que les températures atteignent 12°C (Caron et al., 2000).

1.1.2 Les tétranyques dans les framboisières

Avant la seconde guerre mondiale, les acariens phytophages, surtout ceux de la famille des Tetranychidae, étaient plutôt considérés comme des ravageurs secondaires. Cet état a rapidement changé avec l'arrivée et l'utilisation massive des pesticides tels le DDT et les organophosphatés, ainsi que les fertilisants synthétiques (Huffaker, van de Vrie, & McMurtry, 1969; van de Vrie, McMurtry, & Huffaker, 1972). À cette époque, avec les changements majeurs apportés à l'agriculture et les applications fréquentes de produits phytosanitaires, les acariens phytophages ont rapidement développé de la résistance aux pesticides, si bien que dès les années 50, ils sont devenus des ravageurs d'importance en serre (Hoy, 2011). Dans l'Est du Canada et sur les *Rubus spp.* tels les framboisiers et les mûriers, le tétranyque à deux points peut accomplir jusqu'à dix cycles complets durant une même saison de croissance (Bushway et al., 2008)

En framboisières sous grands tunnels, le tétranyque à deux points est l'arthropode ravageur le plus fréquent et celui dont les dégâts figurent parmi les plus dommageables (Demchak et Hanson, 2013; Heidenreich et al., 2012; Sonneveld et al., 1996). Le tétranyque de McDaniel, *Tetranychus mcdanieli*, est aussi un ravageur important des framboisiers au Québec, par contre, on le retrouve davantage en champ (Caron et al. 2000; Roy et al. 1999; 2002; 2005). En début de saison, les tétranyques se situent surtout dans la partie basse des plants et plus la saison avance, plus ils montent dans la canopée (Heidenreich et al., 2012). Lorsque les populations augmentent, on note souvent des dommages dans la partie supérieure des plants et la présence de toiles peut être observée (Helle et Sabelis, 1985b).

Les dommages causés par les tétranyques débutent généralement par l'apparition de petites lésions chlorotiques blanchâtres sur les feuilles (figure 2a). Ces lésions sont entraînées par l'alimentation des tétranyques : ils percent et aspirent le contenu cellulaire avec leurs stylets (Hoy, 2011a; Reding et al., 2001). Par la suite, de plus larges régions foliaires deviennent jaunes et les feuilles s'enroulent avec la progression de l'alimentation des tétranyques. La présence de toiles est alors apparente (figure 2b). Quand les plants sont infestés de manière plus importante, le bronzage des feuilles et parfois la mort de celles-ci peuvent se produire (Helle et Sabelis, 1985a; Hoy, 2011a; Sonneveld et al.,

1996). La transpiration et la photosynthèse des plants infestés sont modifiées par l'alimentation des tétranyques. En effet, les plantes endommagées par *T. urticae* perdent de grandes quantités d'eau par transpiration, sont moins efficaces lors de la photosynthèse, par la perte de chlorophylle, et absorbent moins de CO₂ (Helle et Sabelis, 1985a). Les résultats d'attaques graves de tétranyques peuvent donc réduire la croissance, le rendement et la performance des plantes infestées. Dans une culture pérenne, telle la framboise, ces dommages peuvent affecter non seulement les rendements de l'année en cours mais aussi ceux des années à venir ainsi que la survie hivernale des plants.



Figure 2. Dommages occasionnés par *T. urticae* sur des framboisiers : a) apparition des taches chlorotiques et b) toiles et bronzage sur feuilles (photos M. St-Laurent).

1.1.3 Les moyens de lutte contre les tétranyques

1.1.3.1 Lutte chimique

Quelques acaricides sont homologués contre les tétranyques en framboisières au Canada, en 2015, on en comptait huit (voir Tableau 1). Parmi ceux-ci, Opal, Kopa et Safer's sont des sels de potassium d'acides gras (savons insecticides) et un est nouvellement homologué : l'huile minérale. Toutefois, ces pesticides présentent des risques de phytotoxicité élevés sur le feuillage lorsqu'appliqués par temps chaud et sec (Lacroix et al., 2015a). D'autres, dont l'Agri-Mek et le Nexter, ne peuvent être pulvérisés qu'en période post-récolte ou, pour le Apollo, au minimum 15 jours avant la cueillette des fruits (Lacroix et al., 2015a). Le Kanemite est aussi un acaricide homologué, mais il aurait une efficacité moindre sur les larves et les adultes que l'Acramite, par exemple (Lacroix et al., 2016). L'Acramite est un acaricide efficace; par contre, il n'agit que sur les formes mobiles, c'est-à-dire les larves et adultes. Afin de retarder l'apparition de résistance, son homologation stipule que l'Acramite ne peut être utilisé qu'une seule fois par saison.

Tableau 1. Principaux acaricides homologués dans la framboise

Acaricide	Matière active (classe)	Délai avant-récolte
Apollo	Clofentézine (10A)	15 jours
Acramite	Bifénazate (25)	1 jour
Agri-Mek	Abamectine (6)	Post-récolte
Kanemite	Acéquinocyl (20B)	1 jour
Nexter	Pyridabène (21)	Post-récolte
Safer's	Savon insecticide (NC)	0 jour
Opal, Kopa	Savon insecticide (NC)	0 jour
Huile Purespray Green 13E	Savon insecticide (NC)	-

Adapté de Lacroix et al., 2015

1.1.3.1.1 Résistance aux pesticides

L'utilisation massive de pesticides a conduit à l'apparition de résistance chez plusieurs insectes et arthropodes, à travers le monde (Hajek, 2004; Hoy, 2011b). Les acariens phytophages n'en font pas exception : ils ont développé une résistance à chacune des classes d'acaricides existantes (Hoy, 2011b). C'est en 1937 qu'une résistance à un pesticide a été enregistrée pour la première fois chez un acarien; c'était chez le tétranyque à deux points (Helle et Sabelis, 1985b). À partir de 1949, soit seulement deux ou trois ans après leur introduction sur le marché, la résistance aux organophosphatés a été le premier échec majeur du contrôle chimique de *T. urticae* (Helle et Sabelis, 1985b).

À ce jour, *Tetranychus urticae* a montré de la résistance à 94 matières actives dans 468 cas répertoriés (Whalon et al., 2016). Parmi tous les arthropodes, *T. urticae* est celui qui a la plus grande prévalence à la résistance aux pesticides (Ferreira et al., 2015; Van Leeuwen et al., 2010; Whalon et al., 2016). Ce phénomène s'explique entre autres par l'usage répété des acaricides, le cycle de vie rapide du tétranyque, son mode de reproduction arrhénotoque, son haut potentiel biotique et la consanguinité (Ferreira et al., 2015; Monteiro et al., 2015; Van Leeuwen et al., 2010). *Tetranychus mcdanieli*, quant à lui, a jusqu'à présent démontré de la résistance envers 13 matières actives (Whalon et al., 2016).

1.1.3.2 Lutte biologique

On retrouve naturellement plusieurs prédateurs de tétranyques dans les framboisières québécoises. Parmi les plus communs, on note les larves et les adultes de phytoséiides (acariens prédateurs), certaines coccinelles, punaises prédatrices, ainsi que les larves de syrphes, chrysopes et cécidomyies (Caron et al., 2000; Lemaire, 2012). Cependant, leur action est plutôt restreinte en culture commerciale due à l'utilisation des pesticides. Afin d'avoir un contrôle biologique adéquat, des introductions d'agents de lutte biologique sont souvent requises.

Plusieurs auxiliaires sont commercialisés pour lutter contre les tétranyques à deux points. Parmi les plus populaires, notons une coccinelle, *Stethorus punctillum* Weise (Coleoptera: Coccinellidae) qui est prédatrice de Tetranychidae. Ce prédateur est indigène au Québec en plus d'être commercialisé pour lutter contre les acariens ravageurs (Roy et al., 2005, 2002, 1999). Quelques acariens phytoséiides sont aussi commercialisés pour lutter contre les tétranyques à deux points. Trois de ces prédateurs de la famille des Phytoseiidae sont du genre *Neoseiulus* (= *Amblyseius*): *Amblyseius andersoni* Chant, *Neoseiulus californicus* McGregor et *Neoseiulus fallacis* Garman. Un quatrième phytoséiide, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot, est réputé très efficace pour le contrôle des tétranyques à deux points. Bien qu'ils soient moins populaires, *Feltiella acarisuga* Vallot (Diptera: Cecidomyiidae) et *Macrolophus pygmaeus* Rambur (Hemiptera: Miridae) sont aussi des agents de lutte aux tétranyques commercialement disponibles au Québec.

1.2 Les Phytoseiidae

La famille des Phytoseiidae est la famille prédatrice d'acariens ravageurs la plus importante en agriculture (Helle et Sabelis, 1985b; Hoy, 2011c; Jeppson et al., 1975). Ces prédateurs ont été le sujet de nombreuses études dans le passé, et encore aujourd'hui, les phytoséiides sont abondamment étudiés. Au printemps 2014, 2 436 espèces de Phytoseiidae dans 91 genres et trois sous-familles (Amblyseiinae, Phytoseiinae et Typhlodrominae) étaient recensées tandis qu'en 1986, c'était plutôt quelques 1 500 espèces dans 79 genres (Demite et al., 2014). Au Canada, en 2014, on retrouvait 100 espèces de phytoséiides (Demite et al., 2014). Parmi les Phytoseiidae, ce sont les genres *Amblyseius* et *Neoseiulus* qui comptent le plus grand nombre d'espèces, soit environ 400 pour chacun (Demite et al., 2014). Il y a des débats taxonomiques dans la littérature scientifique à propos de la nomination des Phytoseiidae (McMurtry et al., 1970; Tixier et

al., 2012; Zhang, 2003). En effet, leur nom peut changer selon les publications : *Neoseiulus californicus*, par exemple, peut aussi être nommé *Amblyseius californicus*.

1.2.1 Biologie des phytoséiides

1.2.1.1 Morphologie

L'apparence classique d'un phytoséiide femelle est un corps long ($\pm 500 \mu\text{m}$) et pyriforme si celle-ci est gravide (*i.e.* contient un œuf). Les mâles, quant à eux, sont de forme ovale et plus petits que les femelles, ils sont généralement aussi plus rapides et mobiles que ces dernières (Hoy, 2011). La majorité des espèces possède des pattes relativement longues. L'apparence brillante de leur corps est aussi caractéristique des Phytoseiidae. Leur couleur change en fonction de leur alimentation et de l'humidité de l'air, allant du blanc au brun, rouge et même noir. Les œufs sont ovales et translucides. La grosseur des phytoséiides varie selon les espèces, les habitats et proies de celles-ci étant variés. Il en est de même pour les setæ (poils) dorsaux ainsi que leur gnathosoma (pièces buccales). En effet, les phytoséiides prédateurs de Tetranychidae auront des soies dorsales et un gnathosoma plus longs, ce qui leur permettrait de mieux se déplacer en présence de toiles (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). De même, les espèces vivant sur des plantes pubescentes sont généralement plus petites avec des corps étroits. Leurs setae, si présents, sont courts sinon, leur bouclier dorsal est lisse (McMurtry et Croft, 1997). Tous les Phytoseiidae (à l'instar des Mesostigmata dont ils font partie) ne possèdent pas de yeux, mais des ocelles seulement (Gerson, Smiley et Ochoa, 2008; Hoy, 2011b).

Tout comme chez les Tetranychidae, le gnathosoma des Phytoseiidae comporte des palpes sensoriels, des chélicères et un stylophore. Le gnathosoma est à la fois une structure sensorielle et sert à capturer et consommer les proies ainsi que pour la copulation chez les mâles (Helle et Sabelis, 1985b). Alors que les palpes sensitifs servent à la détection de nourriture, les chélicères interviennent dans la capture et le maintien des proies durant l'alimentation (Helle et Sabelis, 1985b). Les stylets, quant à eux, permettent de percer et d'extraire les fluides des proies ou des grains de pollen (Helle et Sabelis, 1985b). Le gnathosoma des mâles phytoséiides porte un spermatodactyle dont le rôle est de transférer les spermatophores du mâle à la femelle (Helle et Sabelis, 1985b). Cette structure sert également à l'identification des espèces.

1.2.2.1 Cycle de vie

Les phytoséiides passent par les mêmes cinq stades de développement que leurs proies principales, les tétranyques, soient : œuf, larve hexapode, protonympe, deutonympe et adulte. Aussi, tout comme chez les tétranyques, une période quiescente a lieu entre chaque mue chez certaines espèces (Helle et Sabelis, 1985b; Hoy, 2011c). Les larves n'ont que trois paires de pattes alors que les autres stades mobiles en ont quatre. La plupart des espèces ont besoin de se nourrir au stade larvaire, bien que les larves soient moins motiles que les adultes (Jeppson et al., 1975). Selon cette affirmation, les espèces dont les larves sont plus grosses seraient avantagées. Le cycle de développement des Phytoseiidae nécessite un minimum de 5 à 7 jours bien qu'il varie en fonction des températures et de la disponibilité et qualité de la nourriture (Hoy, 2011c; Jeppson et al., 1975; McMurtry et al., 1970). L'humidité relative est importante pour la survie des œufs et des jeunes larves, un minimum de 60% est requis pour le bon développement de ceux-ci, ainsi que des températures qui, en moyenne, ne vont pas au-delà de 30°C (De Courcy Williams et al., 2004; Ferrero et al., 2010; Monetti et Croft, 1997a). Les femelles phytoséiides pondent en moyenne deux œufs par jour et jusqu'à 60 œufs durant leur vie adulte, ce qui semble être similaire à l'oviposition des femelles Tetranychidae. Tout comme les tétranyques, les mâles de certaines espèces de phytoséiides pratiquent le gardiennage des femelles deutonymphes quiescentes, il y a alors accouplement immédiatement après la mue des femelles en adultes (Hoy, 2011c).

Contrairement aux Tetranychidae, les femelles phytoséiides ont besoin d'être fécondées pour produire des œufs (Hoy, 2011c; Jeppson et al., 1975). Les Phytoseiidae sont pseudo-arrhénotoques, ce qui signifie que les mâles se développent à partir d'œufs fécondés (caryologiquement diploïdes) mais qu'ils sont fonctionnellement haploïdes (Borsa et Kjellberg, 1996; Helle et Sabelis, 1985b; Hoy, 2011c; Sabelis et Nagelkerke, 1988). Ce changement prend place après la syngamie, terme utilisé pour décrire le processus sexué de la fusion de deux gamètes haploïdes (un mâle et un femelle) pour former un zygote diploïde (Campbell et Reece, 2005). En effet, suite à la fécondation il y a perte ou inactivation du jeu de chromosomes mâles chez les œufs qui se développeront en mâle (Pomerantz et Hoy, 2014). Après l'éclosion, les mâles possèdent donc uniquement le jeu de chromosomes maternel. Les femelles pseudo-arrhénotoques peuvent déterminer le sexe des œufs qu'elles déposent (Borsa et Kjellberg, 1996; Nagelkerke et Sabelis, 1998; Pomerantz et Hoy, 2014; Sabelis et Nagelkerke, 1988). L'habitat caractéristique des phytoséiides est fragmenté, les croisements entre frères et

sœurs y sont fréquents et les femelles nouvellement fécondées sortiront de ce fragment d'habitat pour en coloniser d'autres (Borsa et Kjellberg, 1996). Cette théorie se nomme la compétition locale pour les partenaires sexuels (Borsa et Kjellberg, 1996). Dans de telles conditions, un sex-ratio biaisé en faveur des femelles est préférable au niveau de la sélection naturelle. Le sex-ratio optimal dépendrait en effet de la présence, ou non, de familles non-apparentées qui partagent le même fragment d'habitat (Borsa et Kjellberg, 1996). Les ressources alimentaires viendraient aussi jouer un rôle dans la détermination des sexes. Plus il y a de proies dans un habitat, moins la femelle fécondée doit se déplacer pour se nourrir et plus les œufs (qu'elle produit un à la fois, à intervalle régulier) seront déposés près les uns des autres (Sabelis et Nagelkerke, 1988). En présence de ressources alimentaires abondantes, le sex-ratio peut aller jusqu'à 3 :1 en faveur des femelles (selon les espèces). Lorsque peu de proies sont disponibles, le sex-ratio est plutôt de 1 :1 (Sabelis et Nagelkerke, 1988).

1.2.3.1 Comportements

1.2.3.1.1 Localisation des proies

Pendant longtemps, la localisation des proies par les phytoséiides était attribuée à la chance (Sabelis et Van De Baan, 1983; Sabelis, 1981). C'est dans les années 1980 qu'il a été démontré que certains Phytoseiidae réagissaient à des kairomones spécifiques et qu'ils pouvaient donc s'orienter vers leurs proies grâce aux odeurs voyageant dans les courants d'air (Sabelis et Van De Baan, 1983). Toujours selon Sabelis et Van De Baan (1983), les phytoséiides n'ont pas la même réponse aux kairomones de différentes proies, ce qui laisse suggérer une grande spécificité dans la relation prédateur-proie.

Afin de trouver les proies, les phytoséiides détectent non seulement les kairomones mais aussi les toiles et autres indices olfactifs tels les fèces et les composés volatiles végétaux (Hoy, 2011c). Sur une longue distance, les prédateurs s'orientent avec les odeurs qui circulent dans l'air. C'est avec la direction du vent qu'ils localisent une colonie de proies, plutôt qu'avec un gradient d'odeur comme c'est le cas chez d'autres prédateurs/parasitoïdes (Sabelis et Van De Baan, 1983). Les composés végétaux volatiles ont un grand impact sur la localisation de proies par les Phytoseiidae. Les plantes qui sont infestées par des tétranyques, par exemple, émettront des composés volatiles (acide jasmonique, acide salicylique) qui favoriseront la résistance des feuilles ou plantes non-infestées à proximité et induiront l'expression de gènes de défense chez celles-ci (Hoy,

2011c). Ces composés varient dans leur composition selon le type de ravageur qui attaque la plante émettrice. Les phytoséiides répondent d'après cette composition caractéristique de signaux chimiques (Hoy, 2011c). Sur une courte distance, le comportement de localisation des proies n'est pas le même; il y aurait en effet une recherche « à tâtons » de celles-ci. Lorsqu'une colonie est trouvée, les prédateurs s'orientent vers leurs proies de manière aléatoire, utilisant les récepteurs sensoriels qui se situent sur leurs pattes antérieures ainsi que sur leurs palpes (Croft et Jung, 2001; Hoy, 2011c; Johnson et Croft, 1976). Plus la spécificité envers une proie est forte, et plus celle-ci est présente, moins le prédateur se déplacera rapidement et plus sa trajectoire sera sinueuse, indiquant qu'il cherche pour une proie adéquate (Hoy, 2011c; Pratt et al., 1998; Sabelis et Van De Baan, 1983; Sabelis, 1981).

1.2.3.1.2 Dispersion

La dispersion est un élément important dans l'efficacité d'un phytoséiide en lutte biologique. En effet, les acariens prédateurs commercialisés doivent pouvoir se disperser dans la culture à protéger puisqu'il est impossible de déposer ces prédateurs sur chacune des feuilles infestées par des ravageurs. Leur mobilité est donc primordiale pour procurer un contrôle adéquat. La dispersion des phytoséiides a lieu entre autres lorsqu'il n'y a plus de nourriture ou de proies disponibles dans le micro-habitat des prédateurs (Berry et Holtzer, 1990). Elle peut être ambulatoire (quelques centimètres ou mètres) ou aérienne (plusieurs centaines de mètres, selon les vents) (Jung et Croft, 2001). Tous les phytoséiides se déplacent en marchant, mais quelques-uns seulement pratiquent la dispersion aérienne, parmi ceux-ci, notons les espèces commercialisées suivantes : *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus fallacis*, *N. californicus*, *N. cucumeris* et *Amblyseius andersoni* (Jung et Croft, 2001). Notons que la dispersion aérienne a aussi lieu chez plusieurs Tetranychidae, dont *Tetranychus urticae* (Hoy, 2011a, 2011c; Jung et Croft, 2001).

Durant leur période pré-oviposition, les femelles nouvellement adultes et fécondées se dispersent, aussi bien de feuilles en feuilles que de plantes en plantes pour aller former de nouvelles colonies (Croft et Jung, 2001; Hoy, 2011c; Johnson et Croft, 1976; Jung et Croft, 2000). Les immatures ne se déplacent pas ou très peu, sauf s'ils ont besoin de se nourrir et qu'il n'y a pas de ressources à proximité (Croft et Jung, 2001; Hoy, 2011c; Johnson et Croft, 1976; Jung et Croft, 2000). Les individus prêts à se disperser marchent sur le pourtour de feuilles et certains prennent une position de décollage lorsque les

conditions sont adéquates. La position associée au décollage est caractéristique : le phytoséiide se place sur ses pattes postérieures et relève l'avant de son corps (Hoy, 2011c; Johnson et Croft, 1976).

Le moment idéal pour qu'ait lieu la dispersion aérienne se situe entre 16h00 et 22h00, lorsque l'humidité relative et la vitesse du vent augmentent et que la température diminue (Hoy, 2011). L'humidité relative doit être élevée pour maximiser la survie des phytoséiides dispersés s'ils tombent au sol : une longue période sans proie ou sans plante hôte peut causer leur déshydratation, abaisser leur niveau d'énergie et causer leur mort (Auger et al., 1999; Croft et Jung, 2001; Jung et Croft, 2000). La dispersion aérienne est risquée : la femelle doit atterrir sur une plante qui lui est hôte et qui est soit infestée par une proie adéquate ou qui contient une nourriture alternative appropriée (Hoy, 2011). L'atterrissage des prédateurs est aléatoire (Croft et Jung, 2001; Hoy, 2011c; Jung et Croft, 2001). Cependant, en rétractant ou en étendant leurs appendices durant le « vol », les phytoséiides pourraient être en mesure de déterminer un moment propice pour la descente vers le sol (Croft et Jung, 2001; Jung et Croft, 2001; Pratt et al., 1998). Il y a beaucoup de mortalité associée à la dispersion aérienne. Toutefois, lorsqu'il n'y a pas de proies ou de nourriture, le risque associé à la famine est plus grand que celui occasionné par la dispersion aérienne (Auger et al., 1999). Ce type de dispersion est commun au printemps, lorsque les femelles hibernantes quittent leur lieu d'hibernation pour initier une nouvelle colonie sur les plantes hôtes (Auger et al., 1999).

Les caractéristiques biologiques des principaux phytoséiides utilisés dans ce projet sont présentées dans les sections suivantes.

1.2.3.2 *Neoseiulus fallacis* (Acari : Phytoseiidae)

Neoseiulus fallacis est un phytoséiide associé au climat tempéré et humide de l'Amérique du Nord (McMurtry et Croft, 1997; Monetti et Croft, 1997b; Zhang, 2003). Il est indigène au Québec et survit donc à nos hivers (Bostanian et al., 2010; Caron et al., 2000; Lefebvre et al., 2012; Roy et al., 2005). Ce sont les femelles fécondées qui hibernent dans les débris de culture, les boisés ou dans tout autre lieu protégé (Zhang, 2003). Cette espèce se nourrit et se reproduit lorsque les températures se situent entre 9 et 32°C et que l'humidité relative est supérieure à 50% (Applied Bio-nomics Ltd, 2015a). Le cycle d'œuf à adulte prend trois jours à une température de 32°C (Applied Bio-nomics Ltd,

2015a). Dans les vergers de l'état de New York, *N. fallacis* peut compléter de 4 à 6 générations par année (Kain et Nyrop, 1995).

1.2.3.3 *Neoseiulus californicus* (Acari : Phytoseiidae)

Neoseiulus californicus se retrouve autant dans les zones humides des régions semi-tropicales et tempérées de l'Amérique du Sud que dans les régions arides de la Californie et du sud de l'Europe (Monetti et Croft, 1997b). Cette caractéristique fait de cette espèce qu'elle est plus tolérante aux environnements moins humides. *N. californicus* est morphologiquement semblable à *N. fallacis*; seule une identification au microscope permet de les différencier (Lemaire, 2012). À 25°C, *N. californicus* complète un cycle (œufs à œufs) en 7,5 jours, lorsque nourri avec *T. urticae* (Zhang, 2003).

1.2.3.4 *Phytoseiulus persimilis* (Acari : Phytoseiidae)

Phytoseiulus persimilis est un prédateur spécialiste de tétranyques, c'est à dire qu'il se nourrit exclusivement d'acariens du genre *Tetranychus*. Il a de longues pattes, ce qui lui permet de se déplacer rapidement et d'être efficace dans sa recherche de proies (Hoy, 2011c). Les femelles de cette espèce complètent un cycle d'œuf à adulte en 4 jours à 26°C (Zhang, 2003). Dans une population de *P. persimilis*, il y a quatre fois plus de femelles que de mâles ; le sex-ratio est donc de 4 :1 (Applied Bio-nomics Ltd, 2015b). *P. persimilis* serait originaire du Chili mais il a rapidement été introduit dans divers pays, entre autres en Allemagne (Biobest Canada Ltd, 2015a).

1.2.3 Régime alimentaire (type de prédation)

En 1997, McMurtry et Croft ont regroupé les phytoséiides selon quatre différents styles de vie. Ces différences sont surtout basées sur le comportement alimentaire. Les quatre types sont les suivants: Type I : Prédateurs spécialistes d'acariens, Type II : Prédateurs sélectifs d'acariens de la famille des Tetranychidae (associés aux espèces productrices de toiles denses), Type III : Prédateurs généralistes et Type IV : Prédateurs généralistes pollénivores (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). McMurtry et al. (2013) ont plus récemment révisé cette classification et ont ajouté des sous-divisions aux Types I et III.

1.2.3.1 Prédateurs de Type I

Lorsque proposée en 1997, cette catégorie ne regroupait que des phytoséiides du genre *Phytoseiulus* (McMurtry et Croft, 1997). Ces prédateurs démontrent un haut niveau de spécialisation envers les acariens du genre *Tetranychus*, ainsi qu'une réponse densité-

dépendante envers le tétranyque à deux points, *Tetranychus urticae* (McMurtry et Croft, 1997). Le Type I a été revu en 2013 et des sous-groupes ont été créés, ainsi, les *Phytoseiulus* spp. font maintenant partis du sous-groupe I-a, soit les « prédateurs spécialistes du genre *Tetranychus* » (McMurtry et al., 2013). Ceux-ci sont des prédateurs obligatoires, en plus d'avoir co-évolués avec leur proie, ils sont donc très spécifiques. *Phytoseiulus persimilis*, un auxiliaire très connu et populaire fait partie de cette catégorie. Le sous-groupe I-b, quant à lui, regroupe les prédateurs spécialistes des acariens producteurs de « nids de toile » ou Tetranychidae, tel *Typhlodromus* sp. Le sous-groupe I-c correspond plutôt aux prédateurs spécialistes des Tydeidae et comprend surtout les phytoséiides *Paraseiulus* spp. et *Typhlodromina* spp. (McMurtry et al., 2013).

1.2.3.2 Prédateurs de Type II

Les phytoséiides de cette catégorie sont des prédateurs sélectifs de Tetranychidae producteurs de toiles denses (*Oligonychus* spp. et *Tetranychus* spp.), tels les genres *Neoseiulus*, *Galendromus* et *Typhlodromus* (McMurtry et Croft, 1997). Contrairement aux espèces du Type I, les phytoséiides du Type II sont non seulement des prédateurs de plusieurs espèces de tétranyques mais se nourrissent et se reproduisent sur d'autres groupes d'acariens tels les Eriophyidae, les Tarsonemidae et les Tydeoidea ainsi que sur du pollen (McMurtry et al., 2013). Bien que leur réponse à la densité de proies soit moindre que pour les espèces du Type I, certaines espèces du Type II démontrent une forte agrégation là où *Tetranychus urticae* est présent en grand nombre (McMurtry et Croft, 1997). Des phytoséiides importants en lutte biologique sont classés sous ce type, tels *Neoseiulus fallacis* et *N. californicus*.

1.2.3.3 Prédateurs de Type III

Les Phytoseiidae de ce type se nourrissent et se reproduisent sur une grande diversité de proies. Parmi celles-ci, notons les acariens des familles suivantes : Acaridae, Pyroglyphidae, Eriophyidae, Tarsonemida, Tetranychidae, Tenuipalpidae et Tydeidae (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). Les phytoséiides du Type III ont aussi la capacité de se nourrir d'autres petits arthropodes tels que thrips, aleurodes, pucerons, cochenilles et nématodes. Plusieurs espèces de prédateurs de cette catégorie peuvent utiliser du pollen, du miellat, des exsudats de plantes et même des mycètes comme nourriture alternative (McMurtry & Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). En étant aussi généralistes, la prédation intraguilde (*i.e.* une interaction biologique sur un même niveau trophique; c'est un hybride entre la compétition et la prédation (Polis et al., 1989)) ainsi

que le cannibalisme sont davantage marqués dans ce groupe que chez les Phytoseiidae des Types I et II. Une autre différence avec les deux précédents types est l'agrégation des phytoséiides dans les colonies de proies. L'agrégation est en fait inversement densité-dépendante : on retrouve moins de prédateurs sur les feuilles avec une densité de proies élevée que sur celles dont la densité de proies est faible (McMurtry et Croft, 1997). Cette information, jumelée au type de prédation généraliste fait en sorte que les prédateurs du Type III ne sont pas les agents de lutte biologique les plus efficaces. En 2013, McMurtry et al. ont révisé la classification des phytoséiides en tenant compte des micro-habitats des prédateurs de ce groupe. Voici les cinq sous-groupes alors proposés: III-a : prédateurs généralistes vivant sur des plantes pubescentes, III-b : prédateurs généralistes vivant sur des plantes glabre, III-c : prédateurs généralistes vivant dans des espaces confinés sur des dicotylédones, III-d : prédateurs généralistes vivant dans des espaces confinés sur des monocotylédones et III-e : prédateurs généralistes du sol ou de la litière (McMurtry et al., 2013).

1.2.3.4 *Prédateurs de Type IV*

Dans cette catégorie, on retrouve des phytoséiides dont la diète est principalement composée de pollen. Ces espèces ont généralement une capacité de reproduction élevée lorsqu'ils se nourrissent de pollen et leur population est souvent proportionnelle à la floraison des plantes retrouvées dans leur habitat (McMurtry et al., 2013). Certains phytoséiides du Type IV peuvent se nourrir de cellules végétales et sont capables de percer les feuilles, bien que ce comportement ne soit pas tout à fait compris, l'absorption d'eau via le cytoplasme des cellules végétales est une avenue étudiée (McMurtry et al., 2013).

1.2.4 Utilisation en lutte biologique

Plusieurs aspects caractérisent le « parfait » ennemi naturel: la spécificité avec l'hôte/proie, la synchronisation avec le ravageur, un taux de reproduction élevé, la capacité de survivre à des périodes avec peu ou pas de proies disponibles et une bonne capacité de recherche des proies (Hajek, 2004; Hoy, 2011c). Certains phytoséiides peuvent être d'importants auxiliaires parce qu'ils consomment un grand nombre de proies, ont une réponse fonctionnelle de type densité-dépendance et ont un taux de reproduction et de développement élevés. À ces avantages s'ajoute la capacité de faire l'élevage de masse relativement facilement (Hoy, 2011c). Ces acariens prédateurs sont donc tout désignés pour pouvoir être des agents de lutte biologique efficaces. Mondialement, on

retrouve une trentaine d'espèces de Phytoseiidae commercialisés pour la lutte biologique (Gerson et Weintraub, 2007; van Lenteren, 2011).

1.2.4.1 *Neoseiulus fallacis*

L'espèce *N. fallacis* est surtout utilisée pour le contrôle des tétranyques à deux points dans les productions de petits fruits, les serres de poivrons et les pépinières ornementales (Applied Bio-nomics Ltd, 2015a; Jung et Croft, 2001). De nombreuses recherches ont aussi démontré que ces prédateurs sont efficaces dans les vergers et les vignobles canadiens (Bostanian et al., 2010; Lamotte et Fleury, 2012; Lefebvre et al., 2012). Ce prédateur en est un de Type II; il est donc plutôt spécifique aux Tetranychidae mais peut aussi se nourrir d'autres petits arthropodes et de pollen (Lundgren, 2009; McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). Cette caractéristique démontre que, contrairement à d'autres Phytoseiidae comme *P. persimilis*, *N. fallacis* peut survivre et demeurer dans un habitat où peu de proies sont présentes (Applied Bio-nomics Ltd, 2015a). *N. fallacis* est à ce jour résistant à 12 matières actives (Whalon et al., 2016). De plus, 25 pesticides démontrent une toxicité faible à modérée, lorsqu'employés selon les étiquettes, sur certaines souches de *N. fallacis* (Applied Bio-nomics Ltd, 2015a; Caron et al., 2000). Ce phytoséiide est donc un candidat tout indiqué pour la lutte intégrée contre les tétranyques.

1.2.4.2 *Neoseiulus californicus*

Tout comme *N. fallacis*, *N. californicus* est un phytoséiide de Type II. Il est un auxiliaire prédateur d'acariens, et on le retrouve naturellement entre autres sur les fraises, les agrumes et les plantes ornementales en Californie et en Floride (Biobest Ltd, 2015a). Ces prédateurs sont utilisés en lutte biologique pour lutter contre *Tetranychus urticae*, mais aussi contre *T. cinnabarinus*, et le tarsonème trapu (*Polyphagotarsonemus latus*) en serres tout comme en champs (Biobest Ltd, 2015a). *Neoseiulus californicus* est plus adapté à des climats secs que d'autres auxiliaires, tels *P. persimilis* ou *N. fallacis*, par exemple (Audenaert et al., 2014). Un autre avantage de ce phytoséiide est qu'il peut être introduit de façon préventive. En effet, *N. californicus* peut se nourrir de pollen et peut aussi survivre en absence de nourriture (Gugole Ottaviano et al., 2015; McMurtry et Croft, 1997).

1.2.4.3 *Phytoseiulus persimilis*

Phytoseiulus persimilis est un prédateur de Type I, il est donc très spécifique aux Tetranychidae (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). En fait, il serait le

prédateur le plus efficace contre *T. urticae* (Kazak et al., 2015; McMurtry et Croft, 1997; Wood, 1992; Zhang, 2003). Il est très utilisé en lutte biologique à cause de cette grande spécialisation. *P. persimilis* peut fournir un contrôle adéquat du tétranyque à deux points en serres et en champs, toutefois, il est peu performant dans des conditions de hautes températures et de basses humidités (Audenaert et al., 2014; Zhang, 2003). Il est souvent introduit lorsque la population de tétranyques est grande : il ne survit pas si peu de proies sont disponibles (Kazak et al., 2015; Wood, 1992).

Certains facteurs influencent le bon établissement des phytoséiides lors d'une introduction dans une culture. Outre les conditions environnementales, il est important que l'habitat de l'acarien prédateur lui fournisse un abri, des sites d'oviposition et la disponibilité d'une nourriture alternative (Adar et al., 2014; McMurtry et Croft, 1997; Romero et Benson, 2005). Il est possible qu'une plante procure ces éléments : la nourriture alternative est souvent du pollen ou du nectar, les trichomes et domaties, quant à eux, fournissent des sites d'oviposition et des abris (Adar et al., 2014; Vangansbeke et al., 2014). Bien que ces derniers puissent être pourvus par la plante, ce ne sont pas toutes les cultures qui peuvent fournir ces trois composantes à la fois. Advenant que ce ne soit pas le cas, les sources de nourriture alternatives, les abris et sites de ponte peuvent être délibérément introduits dans la culture. Il est alors question de suppléments nutritifs et de plantes réservoirs.

1.3 Suppléments nutritifs

La nourriture alternative sert de supplément aux prédateurs arthropodes quand les proies sont peu nombreuses ou de faible qualité. Cette nourriture alternative influencerait d'ailleurs plusieurs aspects de la vie des ennemis naturels et serait indissociable du comportement et de la physiologie de plusieurs espèces (Lundgren, 2009). En effet, l'omnivorie aurait un impact sur la reproduction, la dispersion, la diapause et la démographie des populations d'ennemis naturels (Lundgren, 2009). Les nourritures alternatives pour arthropodes prédateurs peuvent être du nectar, du miellat, des grains, des mycètes ou du pollen. Pour les besoins de cette étude, nous nous concentrerons sur le pollen comme supplément nutritif.

1.3.1 Rôle du pollen dans la lutte biologique avec phytoséiides

C'est en 1959 qu'on rapporte pour la première fois la consommation de pollen chez des Phytoseiidae (Chant, 1959; McMurtry et al., 1970). Peu de temps après, le pollen est

utilisé dans l'élevage des phytoséiides en laboratoire (McMurtry et Scriven, 1964). Depuis lors, divers pollens ont été utilisés dans de nombreuses recherches comme supplément nutritif pour les phytoséiides (e.g., Delisle et al., 2015; Leman et Messelink, 2015; Vangansbeke et al., 2014). Ils sont désormais reconnus comme étant un facteur important dans la lutte biologique contre les Tetranychidae (Gugole Ottaviano et al., 2015; Kennett et al., 1979; McMurtry et Croft, 1997). Bien que le profil nutritionnel des pollens varie grandement selon les espèces végétales, ils sont une source de protéines, de lipides, de glucides et de minéraux (Delisle, 2014; Lundgren, 2009). Dans certains cas, en poids frais, le pollen procurerait même plus de protéines et de glucides que les proies (Lundgren, 2009). Le pollen serait aussi considéré comme étant la source de nourriture préférée des stades immatures de plusieurs phytoséiides (Vantornhout et al., 2004).

Des nutriments retrouvés dans certains pollens seraient requis pour la diapause chez de nombreux prédateurs arthropodes (Lundgren, 2009). Chez les phytoséiides, les pigments caroténoïdes sont essentiels pour l'induction de la diapause; la vitamine A, ou ses dérivés, que l'on retrouve par exemple dans le pollen, est associée à la réponse photo- et thermo-périodique (Lundgren, 2009; van Houten et Veenendaal, 1990). Étant donné que les phytoséiides n'ont pas de yeux, il est probable qu'ils nécessitent une photoréception extra-rétinale pour induire la diapause, les caroténoïdes seraient donc impliqués à ce niveau (Lundgren, 2009).

1.3.1.1 Le rôle du pollen chez *Neoseiulus fallacis*

L'espèce *N. fallacis* est un prédateur de Type II, il a donc la capacité de se nourrir de pollen (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). Plusieurs études dans le passé ont montré cette capacité du *N. fallacis* à se développer sur du pollen de certaines espèces végétales. Dans Ahlstrom et Rock (1973), par exemple, *N. fallacis* se développe à un rythme semblable qu'il soit nourri avec *T. urticae* ou avec du pollen de *Liriodendron tulipifera*. Une étude plus récente (Pratt et al., 1999), stipule que sur 11 variétés de pollen testés, 73% d'entre elles fournissent à *N. fallacis* une survie similaire à celle donnée par *T. urticae*. De plus, un régime de pollen améliore la survie de *N. fallacis*, lorsque comparé à la famine (Pratt et al., 1999).

1.3.1.2 Le rôle du pollen chez *Neoseiulus californicus*

Tel que mentionné plus haut, *N. californicus* a un régime semblable à celui de *N. fallacis*, tous deux étant prédateurs de Type II (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). L'application de pollen est donc justifiée avec cet auxiliaire. D'ailleurs, il est indiqué

dans la fiche descriptive du supplément nutritif à base de pollen Nutrimite® qu'il convient à *N. californicus* (Biobest Ltd, 2013). Gugole Ottaviano et al. (2015) ont testé la survie de *N. californicus* lorsque nourri avec six différents pollens retrouvés naturellement en fraisières. Leur survie varie de 70 à 90 % selon les pollens alors qu'elle est de 90% avec *T. urticae* (Gugole Ottaviano et al., 2015). Bien que ces pollens ne permettent pas la croissance de la population de *N. californicus*, ils serviraient au maintien de la population et aideraient à limiter la population de tétranyques lorsque ceux-ci commenceraient à coloniser la culture (Gugole Ottaviano et al., 2015). Une autre étude démontre toutefois que deux pollens testés (*Carpobrotus edulis* et *Festuca arundinacea*) en verger de clémentiniers, ne permettent pas d'augmenter la capacité de *N. californicus* à réduire les populations de tétranyques à deux points (Pina et al., 2012). Le pollen peut aussi être utilisé pour l'élevage, du moins à petite échelle, de *N. californicus* (Argov et al., 2006).

Notons que *P. persimilis* faisant partie des prédateurs de Type I (McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013), il ne se nourrit pas de pollen et donc une application de supplément nutritif n'est pas pertinente avec l'utilisation de ce phytoséiide.

1.3.1.3 Le supplément nutritif Nutrimite®

Le Nutrimite® est un complément alimentaire très nutritif, à base de pollen de quenouille (*Typha* spp., Typhaceae), spécialement sélectionné pour stimuler la lutte biologique avec prédateurs phytoséiides et commercialisé par Biobest Ltée. Son utilisation est conseillée avec les prédateurs suivants : *N. californicus*, *N. cucumeris*, *A. andersoni*, *A. degenerans* et *A. swirskii* (Biobest Ltd, 2013). De ces phytoséiides, seul *N. californicus* a le même régime alimentaire que *N. fallacis* (Croft et al., 1998; McMurtry et Croft, 1997; McMurtry et al., 2013). Toujours parmi ces auxiliaires, *N. californicus* et *A. andersoni* sont des prédateurs de tétranyques tandis que les autres (*N. cucumeris*, *A. degenerans* et *A. swirskii*), sont plutôt utilisés dans le contrôle des thrips (Thysanoptera : Thripidae) ou des aleurodes (Hemiptera : Aleyrodidae) (Biobest Ltd, 2015b). Le Nutrimite® sert à accélérer et à améliorer le développement de ces phytoséiides et à maintenir leur population lors de périodes de faible densité de ravageurs ou périodes sans pollen (Biobest Ltd, 2013). Toujours selon Biobest (2013), le Nutrimite® possède les caractéristiques suivantes:

- une nourriture équilibrée riche en éléments nutritifs ;
- garde sa valeur nutritionnelle pendant deux semaines dans les cultures ;
- relativement résistant aux moisissures/ fortes hygrométries relatives ;
- relativement peu appétant pour les thrips ;

- n'attire pas les bourdons, ni les abeilles ;
- peu allergène

Le pollen de quenouille est devenu une nourriture de base dans la recherche sur les acariens prédateurs. En effet, il est utilisé dans plusieurs études parce que c'est une source alimentaire nutritive et qu'il est facilement récolté en grandes quantités (Park et al., 2011).

À ma connaissance, à ce jour, aucune étude portant spécifiquement sur le pollen de *Typha* spp. (Nutrimite®) utilisé avec *N. fallacis* n'a été publiée.

1.4 Plantes-réservoirs

Une plante-réservoir, ou « banker-plant » en anglais, est une plante d'une espèce différente de la culture dans laquelle elle est introduite et qui sert de refuge ou de source continue d'un ennemi naturel dans le but de contrôler un ravageur (Frank, 2010; Pratt et Croft, 2000). Ainsi, le but d'un système de plantes-réservoirs est de maintenir une population d'ennemis naturels dans une culture afin qu'ils fournissent un contrôle à long terme d'un ravageur (Frank, 2010; Parolin et al., 2013) en aidant au développement ainsi qu'à la dispersion de cet ennemi naturel (Pratt et Croft, 2000). Il existe trois composantes de base à un tel système : un auxiliaire, une nourriture alternative et la plante-réservoir elle-même (Huang et al., 2011; Pratt et Croft, 2000). Ainsi, en période de faible densité de proies, la plante-réservoir fournira une nourriture alternative et maintiendra une population d'auxiliaires dans le système cultural. De plus, les plantes-réservoirs peuvent fournir des abris et des sites d'oviposition aux auxiliaires (Parolin et al., 2010).

1.4.1 Utilisation de plantes-réservoirs en lutte biologique

C'est en 1977 que le système de plante-réservoir a été décrit pour la première fois. Ce système était alors utilisé pour la production d'*Encarsia formosa* Gahan, une guêpe parasitoïde, afin de contrôler les aleurodes des serres dans la culture de tomate (Stacey, 1977). Les plantes-réservoirs sont depuis utilisées dans plusieurs cultures contre divers ravageurs. Un exemple bien connu est l'utilisation de céréales, orge ou blé, par exemple, infestées avec le puceron des céréales, *Rhopalosiphum padi* L., et qui supporte *Aphidius colemani* Viereck, une guêpe parasitoïde, pour la suppression de divers pucerons en production horticole en serres (Frank, 2010; Huang et al., 2011; Parolin et al., 2010). Dans cet exemple, *A. colemani* est l'auxiliaire, *R. padi* est la nourriture alternative et la céréale est la plante-réservoir. Il y a plusieurs avantages à l'utilisation des plantes-réservoirs. En

fournissant une source continue d'auxiliaires, les coûts associés à la lutte biologique sont réduits : moins d'introductions seront à faire (Frank, 2010). Un autre avantage non négligeable, et qui rejoint le précédent, réside en la possibilité de protéger les prédateurs préalablement introduits en cas de traitements phytosanitaires. En effet, il est possible de retirer temporairement les plantes-réservoirs hors du milieu de culture lors d'un traitement pesticide et de remettre celles-ci à leur place lorsque le délai sécuritaire requis est passé (Frank, 2010; Huang et al., 2011; Pratt et Croft, 2000).

1.4.2 *Sorbaria sorbifolia*

Le *Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun, ou la Fausse spirée à feuilles de sorbier ou encore le Sorbaria à feuilles de sorbier, est un arbuste de la famille des Rosaceae. Originaire de l'Est asiatique et de Sibérie, il a été introduit en Amérique du Nord en 1974 et est depuis un arbuste ornemental très commun (Frère Marie-Victorin et al., 2002; Rahn, 1989). Le sorbaria peut atteindre 3 mètres de hauteur et fleurit abondamment en juillet et en août (Rahn, 1989). Les feuilles de cet arbuste possèdent entre 9 et 21 folioles d'une longueur entre 4 et 8 cm chacun et les inflorescences en panicules sont de bonnes dimensions, allant de 70 à 340 mm de long (Frère Marie-Victorin et al., 2002; Rahn, 1989). Les fleurs, blanches, sont quant à elles petites et nombreuses, les étamines étant longues, elles dépassent grandement le réceptacle (Rahn, 1989).

1.4.2.1 *Le sorbaria comme plante-réservoir*

Le sorbaria a déjà été l'objet de recherche comme plante-réservoir dans la lutte contre les tétranyques au Québec. En effet, une équipe de l'Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale (IQDHO) a effectué plusieurs années de tests avec cet arbuste en pépinières ornementales. Dès 2009, il a été constaté que les infestations de *T. urticae* en pépinières ne semblaient pas poser de dommages économiques importants sur *S. sorbifolia* (Authier, 2011; Authier et al., 2012; Lemaire et Simard, 2012). Après observations, l'IQDHO en est venu à la conclusion qu'il y avait des prédateurs naturels présents sur ces plantes et qu'ils maintenaient les populations de tétranyques à un faible niveau. Ces résultats ont permis de croire que le sorbaria pourrait être utilisé dans un système de plantes-réservoirs avec les prédateurs indigènes du tétranyque à deux points.

Des essais ont alors eu lieu chez quatre pépiniéristes du Québec afin de caractériser l'abondance des ennemis naturels de *T. urticae* sur le sorbaria. Il est ressorti

de cette étude que les acariens prédateurs, principalement *N. fallacis* et *A. andersoni*, ont été les plus nombreux aux quatre sites et que *N. fallacis* était le plus abondant en présence de tétranyques (Authier, 2011; Lemaire et Simard, 2012). L'efficacité de *S. sorbifolia* placé parmi d'autres espèces infestées par des tétranyques a aussi été observée. Toutefois, il ne semble pas y avoir eu une réduction de l'abondance des tétranyques sur les cultures sensibles lorsque sorbaria y était introduit (Lemaire et Simard, 2012).

Toujours dans l'optique de contrôler les tétranyques, les sorbarias ont aussi été testés comme plantes-réservoirs dans la culture de framboisiers sous tunnels en 2011 et 2012 (Therriault et al., 2013). L'année 2012 a été prometteuse : « La densité de prédateurs observée sur les plantes-réservoirs a été trois fois plus importante que sur les framboisiers » (Therriault et al. 2013, p.19). Cependant, pour cette même année, les populations de tétranyques n'étaient pas différentes, qu'elles eurent été sur les sorbarias ou sur les framboisiers. Des tests avec cages ont aussi été faits avec les mêmes résultats : la population de prédateurs était plus grande dans les traitements avec *S. sorbifolia*, mais la quantité de tétranyques restait semblable peu importe les traitements (Therriault et al., 2013). Il est ressorti de ces tests que le coût associé à la lutte biologique avec plantes-réservoirs est moindre que sans plantes-réservoirs mais supérieur au coût de la lutte conventionnelle. Aussi, la méthode des plantes-réservoirs combinée à des introductions d'acariens prédateurs semblait être prometteuse pour le contrôle des tétranyques à deux points (Therriault et al., 2013). Ces essais préliminaires ont d'ailleurs permis de constater que s'il y a peu de nourriture disponible lors des introductions de *N. fallacis* sur les plantes-réservoirs, ceux-ci tardent à se développer, incapables d'assurer un contrôle suffisant des tétranyques (Therriault et al., 2013).

Bien que *Sorbaria sorbifolia* semblait une approche intéressante, son efficacité en cours de projet a finalement été jugée trop variable pour assurer sa fiabilité comme plantes-réservoirs chez les producteurs (Émilie Lemaire, communication personnelle, 20 novembre 2014). En effet, certains facteurs pourraient avoir un impact sur les effets « réservoirs » du sorbaria; notons entre autres les conditions climatiques, les sites d'utilisation, la culture dans laquelle sorbaria est introduit et les cultivars de *S. sorbifolia*.

1.5 Brumisation

1.5.1 Utilisation en serres

La brumisation est couramment utilisée en serres. En effet, de nombreuses productions serricoles, autant maraîchères qu'ornementales, ont recours à cette technique pour abaisser la température (Baeza et al., 2013; Both, 2008; Connellan, 2002; Suzuki et al., 2015). L'augmentation de l'humidité relative (Both, 2008) et de la photosynthèse (chez la tomate) (Suzuki et al., 2015) sont d'autres effets de la brumisation en serres. Toujours chez la tomate de serre, la brumisation augmenterait aussi les rendements en périodes de faible déficit de pression de vapeur (DPV) (Leonardi et al., 2000; Suzuki et al., 2015). Le DPV est la différence entre la quantité d'humidité contenue dans l'air et la quantité d'humidité que l'air peut contenir lorsque saturé (pour une température donnée) (Both, 2008).

1.5.2 Utilisation en lutte biologique

Des tests de brumisation conduits en framboisiers sous tunnels en Suisse (Linder et al., 2003a) ont démontrés que celle-ci, conjointement avec l'utilisation de *P. persimilis*, avait permis un meilleur contrôle du tétranyque à deux points. De plus, cette même étude a démontré que la brumisation avait eu une légère influence sur la température et l'humidité relative de l'abri, rendant celui-ci moins chaud et davantage humide (Linder et al., 2003a). Une autre étude, celle-ci dans la production de concombres en serres, a démontré que la brumisation était favorable à *P. persimilis* en plus d'abaisser les populations de *T. urticae* (Zhang, 2003).

1.5.2.1 Conditions favorables aux tétranyques

L'environnement sous grands tunnels est plus chaud et sec lorsque comparé aux conditions en champs (Lemaire, 2012; Wien, 2009; Xu et al., 2014). Le milieu étant similaire à celui en serres, *T. urticae* est avantagé. En effet, le tétranyque à deux points se développe plus rapidement et produit davantage d'œufs lorsque l'humidité relative est faible (25-30%HR) plutôt qu'élevée (85-90%HR) (Helle et Sabelis, 1985a; van de Vrie et al., 1972; Walzer et al., 2007; Wood, 1992). La survie des stades immatures, la longévité des adultes et le pourcentage d'éclosion des œufs sont aussi favorisés par des conditions d'humidité relative faible (Holtzer et al., 1988; Wood, 1992). Les dommages foliaires encourus sont plus grands lorsque l'humidité relative est basse : chez les tétranyques, la perte d'eau par transpiration dans un environnement sec peut être remplacée pendant

l'alimentation. Les tétranyques consomment alors davantage de substances nutritives pour compenser leur perte en eau (Helle et Sabelis, 1985a). La brumisation des tunnels peut diminuer les températures et maintenir une humidité relative (HR) plus haute et constante, créant ainsi un environnement moins propice à *T. urticae* (Funt et Hall, 2013; Zhang, 2003).

1.5.2.2 Conditions favorables aux phytoséiides

Selon les espèces, les Phytoseiidae se développent, se reproduisent et performant généralement mieux lorsque les températures sont chaudes (entre 15°C et 30°C) mais pas extrêmes (>35°C) et que l'humidité relative (HR) est plutôt élevée (>50%) et constante (Helle et Sabelis, 1985b). Ce sont surtout les stades immatures (œufs et larves) qui sont affectés par une faible humidité (Croft et Croft, 1993; Croft et al., 1993; De Courcy Williams et al., 2004; Ferrero et al., 2010; Helle et Sabelis, 1985b; Monetti et Croft, 1997b; Walzer et al., 2007). La tolérance à l'humidité des divers phytoséiides serait liée à celle retrouvée dans leur lieu d'origine (Croft et al., 1993). Ainsi, *N. fallacis* étant indigène en climat tempéré humide de l'Amérique du Nord, un faible taux d'humidité relative lui serait néfaste. Pour les œufs de *N. fallacis*, à 20°C, l'humidité létale (LH₅₀) se situe autour de 70% (Croft et al., 1993). Toujours chez ce phytoséiide, à une température de 20°C et 50% d'HR, la mortalité des larves atteint 91,9% pour les individus qui sont nourris et 98,1% chez ceux en situation de famine (Croft et al., 1993).

1.5.3 Performance des framboisiers

Les températures optimales pour la croissance des framboisiers se situent entre 18°C et 25°C (Bushway et al., 2008; Funt et Hall, 2013; Heidenreich et al., 2012). Les extrêmes journaliers, surtout les températures élevées, sont à éviter. Toujours chez le framboisier, la photosynthèse est à son apogée lorsque les températures se trouvent entre 17°C et 21°C ; au-delà de 25°C, la photosynthèse est considérablement réduite et la croissance des plants est donc limitée (Funt et Hall, 2013). La brumisation des tunnels a le potentiel de réduire les extrêmes journaliers de température, contribuant du fait même à protéger les plants et assurant donc un meilleur développement des framboisiers et une production de fruits accrue (Funt et Hall, 2013).

1.6 Culture du framboisier

Le framboisier fait partie du genre *Rubus* de la famille des *Rosaceae*. *Rubus idaeus* Linnaeus ou le framboisier rouge, est l'espèce qui est maintenant cultivée sur tous

les continents, hormis l'Antarctique (Funt et Hall, 2013). Les framboisiers sont classés en deux groupes, selon leur fructification : les framboisiers non-remontants et les framboisiers remontants.

1.6.1 Framboisiers non-remontants

Le cycle naturel de la plante se déroule sur deux ans (figure 3). Les framboisiers non-remontants, aussi appelés « framboises d'été » produisent une seule récolte par année à partir des tiges de l'année précédente. En effet, au premier printemps, les turions (pousses végétatives) croissent et portent les bourgeons florifères pour l'année suivante. Ces tiges herbacées sont appelées « primocanes » (Funt et Hall, 2013). Au deuxième printemps, les bourgeons de ces cannes se développent en rameaux florifères horizontaux ou « floricanes » (Funt et Hall, 2013). Au Québec, il y a floraison à la fin mai et en juin tandis que la récolte des fruits se fait normalement en juillet et août (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007; Funt et Hall, 2013). Les cannes qui ont produit sèchent et meurent, et sont ensuite remplacées par de nouveaux turions qui proviennent de la base du plant (Funt et Hall, 2013).

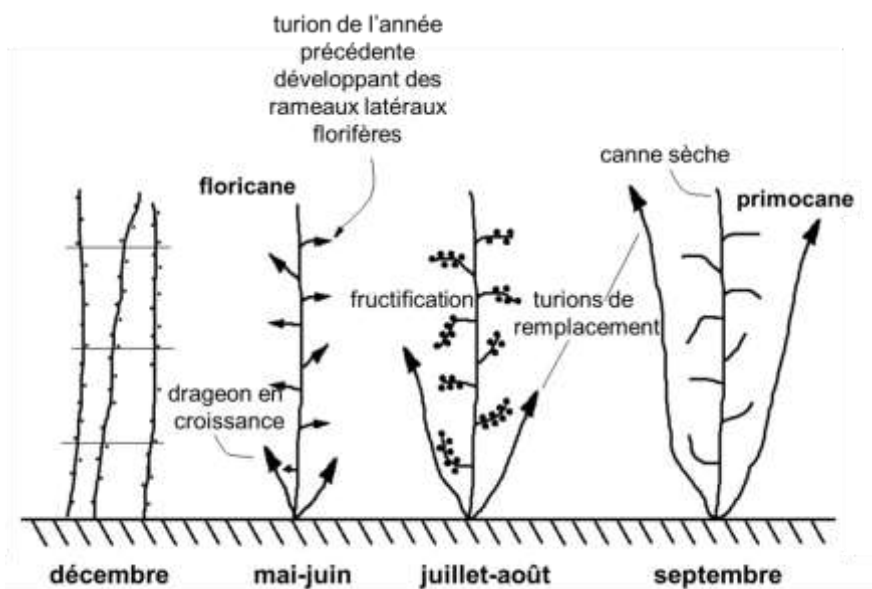


Figure 3. Cycle de production du framboisier non-remontant. Adaptée de Edin et al., 1999.

1.6.2 Framboisiers remontants

Tout comme chez le framboisier non-remontant, le cycle de ce type de framboisier se complète sur deux ans (figure 4). Par contre, le turion peut fleurir dès la première année de croissance, il y a alors fructification sur les primocanes (Funt et Hall, 2013). Au

premier printemps, un turion sort de terre et produit des rameaux florifères horizontaux. La partie du turion qui a produit les fruits sèche et meurt (Funt et Hall, 2013). Toutefois, la partie basale possède encore des bourgeons et se comportera comme un framboisier non-remontant (Funt et Hall, 2013). Le framboisier donne alors chronologiquement une première récolte en juillet sur le turion de l'année précédente et une seconde récolte en septembre-octobre sur le turion de l'année en cours (Funt et Hall, 2013). Cependant, au Québec, les producteurs n'ont pas tendance à garder les turions durant deux années; ils coupent plutôt toutes les tiges après la production et n'auront donc que des nouvelles tiges en productions la saison suivante (S. Tellier, communication personnelle). Les framboisiers remontants sont aussi appelés « framboise d'automne » (Edin et al., 1999).

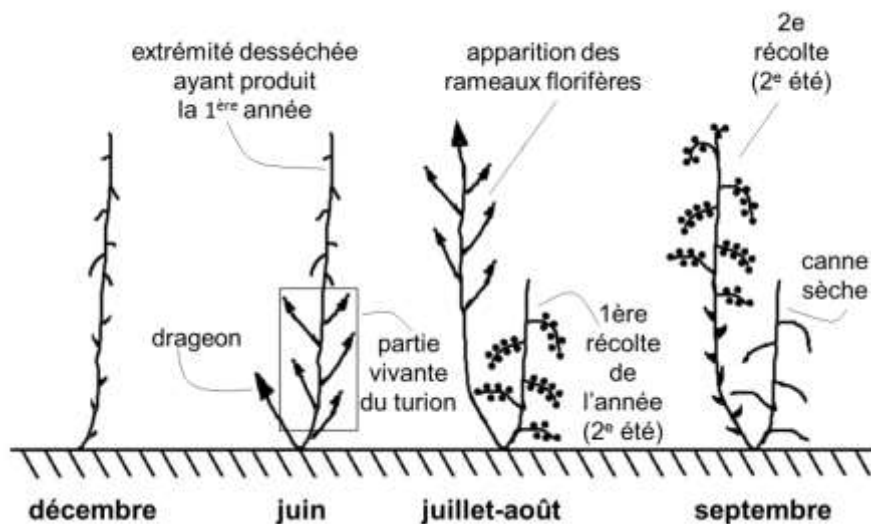


Figure 4. Cycle de production du framboisier remontant. Adaptée de Edin et al., 1999.

Deux opérations d'entretien ont des impacts significatifs sur le rendement, la qualité ainsi que la grosseur des fruits et la santé générale des framboisières : la taille et le palissage.

1.6.1.1 Taille des framboisiers

Il est essentiel de tailler les framboisiers afin de favoriser une croissance et des rendements optimaux. La taille permet entre autres de diminuer la densité des tiges et donc d'augmenter l'exposition à la lumière et de faciliter l'aération sur le rang (Funt et Hall, 2013). Essentiellement, la taille consiste à retirer les cannes qui ne produisent plus ou qui sont de faible diamètre et donc moins productives. L'enlèvement des tiges malades,

brisées ou mortes fait aussi partie de la taille (Funt et Hall, 2013). Au printemps, dès que la neige a fondu, les vieilles cannes sont coupées au niveau du sol et celles abîmées par l'hiver sont taillées sous les dommages (Funt et Hall, 2013). Il en est de même pour les tiges de petit diamètre (moins de 0,6 cm), si bien que seulement celles avec les diamètres les plus grands sont gardées. Ce seront aussi ces cannes qui deviendront les plus grandes, atteignant jusqu'à 2,7 mètres, selon les cultivars, et qui produiront le plus de fruits de gros calibre (Funt et Hall, 2013). Il faut aussi enlever les vieux turions une fois la récolte terminée : les cannes qui ont produit ainsi que les nouvelles pousses qui sont trop petites, malades ou trop près les unes des autres sont retirées (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007). La densité de cannes idéale est de douze à quinze tiges par mètre linéaire (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007; Funt et Hall, 2013).

La conduite bisannuelle est une autre manière de cultiver la framboise, aussi bien les variétés remontantes que non-remontantes. Cette méthode est bien adaptée à la culture de plants hors-sol et sous grands tunnels, la rentabilité de ceux-ci étant améliorée (Edin et al., 1999). Cette approche, sera plus grandement discutée dans la section 1.6.4.

1.6.1.2 Palissage des framboisiers

Le palissage fait référence à l'utilisation de systèmes de supports sur lesquels les cannes sont attachées ou soutenues (Funt et Hall, 2013). Ces systèmes facilitent la récolte, améliorent la qualité, la propreté et le rendement des fruits, supportent les tiges lors de forts vents et réduisent l'incidence de la maladie autant sur les fruits que sur les cannes (Funt et Hall, 2013). Il existe plusieurs types de palissage, notamment le palissage entre deux fils (ou en « H »), le palissage en « V » et le palissage entre deux fils mobiles (en « I ») (CPVQ, 1997; Edin et al., 1999; Funt et Hall, 2013).

1.6.3 Principaux ravageurs et maladies des framboisières

1.6.3.1 Ravageurs

Outre les tétranyques, de nombreux arthropodes ravageurs s'attaquent aux framboisières québécoises. Parmi ceux-ci, l'anthonome de la fleur du fraisier, *Anthonomus signatus* Say (Coleoptera : Curculionidae), est présent année après année et peut causer des dommages importants dans les framboisières (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007; Lambert et al., 2007). L'anthonome est un petit coléoptère qui, après avoir déposé un œuf dans le bouton floral encore fermé, sectionne le pédoncule de ce dernier. Les

bourgeons floraux ainsi attaqués tombent au sol ou restent suspendus. L'incidence de l'anthonome perdure durant toute la période de floraison (Lambert et al., 2007). La punaise terne (*Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois (Heteroptera : Miridae)) est un autre ravageur retrouvé dans les framboisières. En effet, les larves et adultes de cette punaise se nourrissent des boutons floraux et des drupéoles de framboises (Lambert et al., 2007). Depuis les dernières années, la drosophile à ailes tachetées (DAT) est très présente dans les productions québécoises de petits fruits. *Drosophila suzukii* Matsumara (Diptera : Drosophilidae) a fait son apparition au Canada en 2009 et dans la province en 2010 (Hauser, 2011). Contrairement aux autres drosophiles, les femelles DAT déposent leurs œufs à l'aide de leur ovipositeur robuste, sclérifié et denté dans les fruits sains qui sont en mûrissement (Rota-Stabelli et al., 2013). Les larves se nourrissent de l'intérieur des fruits mûrs et ceux-ci s'affaissent, les rendant donc invendables (Rota-Stabelli et al., 2013). Cependant, au Québec, ce sont chez les framboises d'automne (framboisiers remontants) que les plus grandes pertes sont enregistrées (Lacroix et Harnois, 2013). D'autres arthropodes ravageurs sont présents dans les framboisiers, leurs dommages variant selon les années et l'emplacement géographique de la culture, parmi ceux-ci, notons : l'anneleur du framboisier, le byture du framboisier, le rhizophage du framboisier, le nitidule à quatre points, les pucerons, les scarabées japonais et du rosier, les squeletteuses et les tenthrèdes (Lacroix et al., 2015b; Lambert et al., 2007).

1.6.3.2 Auxiliaires

Une population naturelle d'arthropodes bénéfiques se trouve aussi dans les framboisières. Parmi les plus abondants, notons les acariens prédateurs (*N. fallacis*) et une coccinelle, *Stethorus punctillum* Weise (Coleoptera : Coccinellidae), qui sont d'importants prédateurs de tétranyques (Lambert et al., 2007; Roy et al., 2005, 1999). Les larves de chrysopes et d'hémérobies (Neuroptera : Chrysopidae, Hemerobiidae) se nourrissent de plusieurs ravageurs arthropodes à corps mou tels que pucerons, cochenilles, thrips, acariens, etc. (Lambert et al., 2007). Diverses mouches prédatrices et guêpes parasitoïdes ainsi que des punaises prédatrices se retrouvent aussi naturellement dans les framboisières québécoises (Lambert et al., 2007).

1.6.3.3 Phytopathologie

Les maladies les plus fréquentes chez le framboisier sont l'anthracnose (*Elsinoe veneta*) et la brûlure des dards (*Didymella applanata*), toutes deux causées par des champignons pathogènes (Lambert et al., 2007). Le premier peut causer des dommages

importants lorsque le printemps est frais et pluvieux tandis que le second semble favorisé par une aération déficiente (Lambert et al., 2007). La moisissure grise (*Botrytis cinerea*), le feu bactérien (*Erwinia amylovora*), le pourridié des racines (*Phytophthora fragariae* var. *rubi*), la tache septorienne (*Sphaerulina rubi*), la tumeur du collet et de la tige (*Agrobacterium tumefaciens* et *A. rubi*) ainsi que la rouille jaune tardive (*Pucciniastrum americanum*) sont aussi des maladies fréquemment retrouvées en framboisières (Lacroix et al., 2015b; Lambert et al., 2007).

1.6.4 Culture de framboisiers sous grands tunnels

L'intérêt pour la culture sous grands tunnels s'est accru au cours des dernières années en Amérique du Nord. De nombreux producteurs de petits fruits du Canada et du nord des États-Unis ont installé ces structures dans la dernière décennie (Demchak et Hanson, 2013; Xu et al., 2014). Si bien qu'aujourd'hui, la framboise en grands tunnels est la principale culture sous abri au Québec (Xu et al., 2014). En 2010, sur un total de 32 hectares de grands tunnels, on recensait 22 hectares en framboises, huit en légumes (concombres, tomates, poivrons, etc.) et deux en fraises (Villeneuve, 2011). En 2013, c'était plutôt 40 producteurs de framboises sous grands tunnels qui étaient présents au Québec (Landry, 2013).

Autant les framboisiers remontants que non-remontants peuvent être cultivés sous grands tunnels. L'investissement de départ pour se munir de telles infrastructures est important : le coût de la structure d'un seul tunnel est estimé à près de 10 000 \$ (Heidenreich et al., 2012). Selon les matériaux utilisés et la surface des tunnels, au Québec, il en coûterait entre 0,60 \$ et 6,00 \$/pi² (Landry, 2013). Toutefois, la durée de vie des grands tunnels est de dix ans (Heidenreich et al., 2012), et les profits annuels sont grands : près de 37 000 \$/ha chez les framboisiers remontants (Brown et Hanson, 2014).

Afin de faciliter la conduite de culture, la production de framboisiers sous grands tunnels peut se faire de manière hors-sol (en pots ou en sacs). Cette technique améliore le potentiel de production et permet de cultiver là où le sol est de moindre qualité, contaminé ou là où il y a présence de maladies telluriques (Brown et Hanson, 2014; Edin et al., 1999; Landry et al., 2013). De plus, la conduite hors-sol des variétés non remontantes permet la manipulation des pots de culture afin d'hiverner des variétés de framboises qui ne sont pas rustiques au Québec, mais commercialement intéressantes (Landry et al., 2013). La conduite bisannuelle des cultivars non remontants est alors

facilitée. Bien que ce type de conduite nécessite une pépinière de production, beaucoup de manipulation et donc de la main d'œuvre importante, de nombreux avantages y sont rattachés (Edin et al., 1999; Heidenreich et al., 2012), entre autres une meilleure production. En effet, la production alternée ou encore bisannuelle, provoque une mise à fruits aux deux ans. L'année où les plants sont en production, tous les turions de remplacement sont éliminés. Une fois la fructification terminée, les cannes sèches sont coupées et les contenants de production sont retirés des tunnels pour l'hivernage. L'année suivante, sur ces mêmes plants placés en pépinière, il n'y aura que des pousses végétatives qui, après avoir hiverné, fructifieront à leur tour (CPVQ, 1997; Edin et al., 1999). La conduite hors-sol sous grands tunnels nécessite un système d'irrigation (goutte-à-goutte) pour assurer les besoins en eau de la plante. La fertilisation se fait aussi via ce système, avec un système d'injection, on parle alors de « fertigation ». Ces systèmes se retrouvent aussi dans la culture en champ du framboisier d'automne.

La production de framboises sous grands tunnels présente de nombreux avantages comparativement aux fruits produits en champs. Parmi les principaux, notons une protection contre la pluie et le vent ainsi qu'une saison de culture allongée de quelques semaines (Castilho et al., 2015; Demchak et Hanson, 2013; Wien, 2009; Xu et al., 2014). Les plants et les fruits n'étant pas exposés aux intempéries, il y a une nette réduction des maladies, notamment la moisissure grise (*Botrytis cinerea*) (Demchak et Hanson, 2013; Funt et Hall, 2013; Heidenreich et al., 2012). La qualité et l'uniformité des fruits sont aussi accrues, de même que la conservation post-récolte (Demchak et Hanson, 2013; Heidenreich et al., 2012). Ces attributs permettent aux producteurs d'avoir de meilleurs rendements, jusqu'à plus de deux fois ceux obtenus en champ (Xu et al., 2014). En effet, chez le cultivar de framboisier non-remontant 'Jeanne d'Orléans', le rendement est de 2 762 g/mètre linéaire lorsque cultivé sous grands tunnels et de 1 185 g/mètre linéaire en champs (Xu et al., 2014). Chez la variété remontante 'Polka', ce sont des rendements de 3 358 g/m linéaire qui sont obtenus sous grands tunnels comparé à 1 563 g/m linéaire en champs (Xu et al., 2014). Toutefois, les grands tunnels créent des conditions propices à la multiplication des tétranyques (Castilho et al., 2015; Demchak et Hanson, 2013; Heidenreich et al., 2012; Sonneveld et al., 1996).

1.7 Problématique

La culture sous tunnels prend de plus en plus d'ampleur au Québec. Entre 2006 et 2010, la superficie de cultures sous tunnels a plus que quintuplée, passant de six à 32

hectares (Villeneuve, 2011). De cette superficie, 22 hectares (68%) étaient cultivés en framboises, chez un total de 18 producteurs (Villeneuve, 2011). En 2013, on retrouvait 40 producteurs de framboises sous tunnels (Landry, 2013) mais le nombre exact d'hectares n'a pas été mis à jour depuis 2010. Toutefois, le nombre d'entreprises produisant des framboises sous grands tunnels ayant doublé entre 2010 et 2013, il est logique de croire qu'il en est de même pour les superficies. Les rendements sous tunnels étant très supérieurs à ceux en champs, les tunnels sont certainement là pour rester. Cependant, il n'y a pas que des avantages à la culture sous grands tunnels ; il a été démontré qu'il y a une fréquence accrue de résidus de pesticides sur les produits issus d'environnements protégés comparé aux cultures cultivées en plein champ (Allen et al., 2015). Une diminution de la photodégradation et du « lavage » naturel des fruits par la pluie en serait la cause. En outre, les films polyéthylènes des tunnels créent des conditions optimales à la prolifération des tétranyques à deux points.

L'efficacité des phytoséiides est bien documentée (voir section 1.2.4 du présent chapitre) et le succès de la lutte biologique avec prédateurs introduits en framboisière sous grands tunnels a été démontré dans le passé (e.g. Heidenreich et al., 2012; Lemaire, 2012). Toutefois, plusieurs introductions de prédateurs sont souvent nécessaires, rendant cette méthode onéreuse et donc moins intéressante pour les producteurs. Par exemple, une seule introduction de *N. fallacis* en mode curatif (5-6 individus/m²) revient à 1 440 \$/ha comparativement à environ 250 \$/ha pour une application d'acaricide (observation personnelle). De plus, comme mentionné précédemment, le potentiel de *T. urticae* à développer de la résistance aux acaricides qui sont présentement homologués est élevé : son cycle de vie rapide, sa grande capacité de reproduction, l'utilisation répétée d'acaricides ainsi que l'apparition de résistance à de nombreuses matières actives dans le passé est éloquent. Finalement, malgré leur efficacité, l'homologation de certains acaricides stipule qu'ils ne peuvent être utilisés qu'une seule fois par saison de culture.

Il apparaît donc essentiel de développer une stratégie de lutte intégrée alternative afin de favoriser le développement et le maintien des Phytoseiidae et ainsi diminuer les coûts de la lutte biologique dans les framboisières sous tunnels. Ici, nous proposons de tester l'effet d'une plante-réservoir, d'un supplément nutritif (pollen) et de la brumisation sur les populations de phytoséiides introduits et de tétranyques à deux points.

1.8 Objectifs et hypothèses de recherche

1.8.1 Objectif général

Le principal objectif de cette étude était d'améliorer l'efficacité de la lutte intégrée contre les tétranyques tout en diminuant le nombre d'introductions requises de prédateurs dans la culture du framboisier sous grands tunnels.

1.8.2 Objectif spécifique 1

Le premier objectif spécifique de ce projet était de tester l'efficacité de plusieurs techniques de lutte intégrée soit : a) le prédateur *N. fallacis*¹ combiné à la plante-réservoir *S. sorbifolia*; b) le prédateur *N. fallacis* combiné à un supplément nutritif pour phytoséiides; c) le prédateur *N. fallacis* combiné à la brumisation; et d) plusieurs combinaisons de ces techniques, et les comparer à l'utilisation du prédateur *N. fallacis* seul (témoin).

1.8.2.1 Hypothèses :

1.8.2.1.1 Ces techniques permettront un meilleur contrôle du tétranyque que l'utilisation des prédateurs seuls.

1.8.2.1.2 Ces techniques permettront de diminuer le nombre d'introductions requises de prédateurs pour assurer un contrôle efficace.

1.8.2.1.3 Les deux combinaisons de techniques les plus efficaces pour le contrôle du tétranyque seront «supplément nutritif et plante-réservoir» et «supplément nutritif et brumisation».

1.8.3 Objectif spécifique 2

Le second objectif spécifique du projet était d'estimer le coût (\$/ha) de chacune des stratégies de lutte intégrée et les comparer à la lutte conventionnelle (avec acaricides uniquement).

1.9 Approche méthodologique

Ce projet de recherche a été réalisé dans un contexte reflétant aussi fidèlement que possible la réalité de l'industrie horticole québécoise. Les essais ont eu lieu en 2014 et 2015 chez deux producteurs de framboises sous grands tunnels. De plus, les densités

¹ En cours de projet, et pour toutes les combinaisons de techniques, d'autres espèces de phytoséiides ont été introduites afin d'offrir un contrôle adéquat des populations de tétranyques chez les producteurs participants au projet.

de tétranyques naturellement présentes ont été utilisées. La principale espèce de phytoséiide introduite fut *N. fallacis*. Les espèces *P. persimilis* et *N. californicus* furent introduites, au besoin, sur foyer de tétranyques (*P. persimilis*) et globalement (*N. californicus*). Les populations d'acariens prédateurs et ravageurs ont été suivies via un échantillonnage hebdomadaire *in situ* en mai-juin et destructif (= cueillette de folioles) de mi-juin à mi-septembre.

Chapitre II: Potential and cost of a pollen supplement, a banker plant and misting for enhancing biological control of *Tetranychus urticae* with *Neoseiulus fallacis* in high tunnel raspberry production in Quebec, Canada

Résumé

La production sous grands tunnels améliore le rendement et la qualité des fruits, mais fournit également un environnement idéal pour la prolifération de *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). Bien que des acaricides soient disponibles, les délais avant-récolte et le développement de résistance peuvent être problématiques. Le prédateur *Neoseiulus fallacis* Garman (Acari: Phytoseiidae), est bien connu pour son efficacité à contrôler les tétranyques. Cependant, son utilisation a tendance à être coûteuse, puisque plusieurs introductions sont souvent nécessaires au cours d'une même saison de production. L'objectif principal de cette étude était d'améliorer l'efficacité de la lutte intégrée des ravageurs *T. urticae* tout en diminuant le nombre d'introductions de phytoséiides dans la culture de framboises sous grands tunnels. Nous avons testé l'efficacité du Nutrimite® (de Biobest), un supplément alimentaire pour acariens prédateurs, une plante-réservoir (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun (Rosaceae)), et la brumisation afin de réduire le coût de la lutte biologique aux tétranyques en framboisière sous tunnels. Ce projet de recherche a été réalisé dans un contexte qui reflète le plus fidèlement possible la réalité de l'industrie horticole du Québec: les essais ont eu lieu chez deux producteurs de framboises en grands tunnels avec des populations de tétranyques naturelles. Les données recueillies par dépistage ont démontrées que le Nutrimite a eu un effet positif sur l'efficacité prédatrice de *N. fallacis*, que la brumisation réduit les populations de *T. urticae* et que *S. sorbifolia* n'a eu aucun effet comme plante-réservoir.

1 **Abstract**

2 High tunnels increase yield and improve fruit quality but also provide an ideal
3 environment for *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) outbreaks. Acaricide
4 application is an option, but pre-harvest interval and development of resistance among
5 spider mite can be problematic. Predatory mites such as *Neoseiulus fallacis* Garman
6 (Acari: Phytoseiidae) are well known for their efficacy against spider mites, but biological
7 control with phytoseiids can be costly, as several introductions are required throughout the
8 season. The main objective of this study was to test strategies for improving the efficacy of
9 integrated pest management of *T. urticae* while decreasing the number of phytoseiid mite
10 introductions needed in high tunnel raspberries, and reducing costs. We tested the efficacy
11 of a pollen supplement (Nutrimite® from Biobest) for phytoseiids, banker plants (*Sorbaria*
12 *sorbifolia* (L.) A. Braun (Rosaceae)), and misting. Both the pollen supplement and misting
13 were found to reduce *T. urticae* densities. Our findings may make biological control more
14 attractive to growers.

Introduction

Interest in high tunnel production has increased in recent years in North America. Many berry growers in the northern United States and Canada have established these structures over the last decade (Demchak and Hanson 2013; Xu et al. 2014), and high tunnel raspberry is the main protected crop grown in the province of Quebec nowadays (Villeneuve, 2011; Xu et al., 2014).

High tunnel raspberry cultivation offers several advantages: it protects the crop from rain and heavy winds, and extends the growing season (Wien 2009; Demchak and Hanson 2013; Xu et al. 2014; Castilho et al. 2015). Because the fruits are not exposed to rain, there is a significant reduction of diseases such as gray mold (*Botrytis cinerea*) (Heidenreich et al. 2012; Demchak and Hanson 2013; Funt et Hall 2013). These attributes allow growers to achieve higher crop yields, up to more than twice those obtained with field grown raspberries (Xu et al., 2014). Compared to field-grown raspberries, those grown under tunnel exhibit a higher level of cosmetic quality and uniformity, as well as better post-harvest conservation (Heidenreich et al. 2012; Demchak and Hanson 2013).

However, protected crops have been found to contain a greater number of detectable pesticides with a higher proportion of samples containing multiple pesticide residues when compared to analogous crops grown in an open field (Allen et al., 2015). High tunnels also provide ideal conditions for the proliferation of spider mites (Sonneveld et al. 1996; Heidenreich et al. 2012; Demchak and Hanson 2013; Castilho et al. 2015). The tunnel environment is hotter and dryer than field conditions (Lemaire, 2012; Wien, 2009; Xu et al., 2014), which favors two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) proliferation. This mite pest grows faster and produces more eggs when relative humidity is low (25-30%) rather than high (85-90%) (van de Vrie et al. 1972; Helle and Sabelis 1985a; Wood 1992; Walzer et al. 2007). The survival of immature stages, adult life-span and percentage of egg hatch are also favored by conditions of low relative humidity (Holtzer et al. 1988; Wood, 1992), as is leaf damage (Helle and Sabelis 1985a).

The two-spotted spider mite (TSSM), *Tetranychus urticae*, is the most common arthropod pest, and is among the most damaging to raspberry grown under high tunnels (Sonneveld et al. 1996; Heidenreich et al. 2012; Demchak and Hanson 2013). While several miticides are registered against TSSM, pre-harvest application intervals and

resistance development can be problematic (Van Leeuwen et al. 2010; Yorulmaz Salman and Saritaş 2014). Moreover, to date, *T. urticae* showed resistance to 94 active ingredients listed in 468 cases (Whalon et al., 2016). Among all arthropod pests, the TSSM has the highest prevalence of pesticide resistance (Ferreira et al., 2015; Van Leeuwen et al., 2010; Whalon et al., 2016).

Phytoseiid mites are important natural enemies of spider mites, and are widely used in biological control programs (Helle and Sabelis 1985b; McMurtry and Croft 1997; McMurtry et al. 2013). While the effectiveness of phytoseiid mites for spider mite control in high tunnel raspberries has been demonstrated in the past (e.g. Heidenreich et al. 2012; Lemaire 2012), several introductions can often be needed, making this method expensive (Pratt and Croft 2000; Frank 2010) and therefore less attractive to growers.

Neoseiulus fallacis is a commercially available phytoseiid native to Quebec and an effective natural enemy of TSSM (Bostanian et al., 2010; Roy et al., 2005). These attributes were important in selecting a predator species for introduction in a perennial system such as cultivated raspberry and made *N. fallacis* an ideal candidate for our tests. According to the classification proposed by McMurtry and Croft (1997), *N. fallacis* is a Type II predator, meaning that it is a selective predator of tetranychid mites and can also feed and complete their development on other arthropods and pollen (McMurtry and Croft 1997; Pratt et al. 1999; Lundgren 2009; McMurtry et al. 2013). A diet of pollen improves *N. fallacis* survival by more than 2.5 times compared to a starvation regimen (Pratt et al., 1999). Supplementing pollen to generalist predators is a practice that is becoming more common in biological control programs (e.g., Duarte et al., 2015; Janssen et Sabelis, 2015).

Banker plants are used in many crops to enhance establishment, development and dispersal of beneficial organisms employed in biological control and thereby contribute to long-term suppression of a pest (Pratt and Croft 2000; Frank 2010; Parolin et al. 2010; Huang et al. 2011; Messelink et al. 2014). A study by the Quebec Institute for Expertise in Ornamental Horticulture (IQDHO) suggested that *Sorbaria sorbifolia* (Rosaceae), a shrub commonly grown in ornamental nurseries, could have potential for use as a banker plant among nursery crops in Quebec (Authier et al., 2012). In Authier et al (2012), *S. sorbifolia* was found to be an attractive plant for phytoseiid mites, including *N. fallacis* (Authier et al. 2012; Huot 2012; Lemaire and Simard 2012).

While misting is widely used in greenhouses to reduce temperatures (Baeza et al., 2013; Both, 2008; Connellan, 2002; Suzuki et al., 2015), it is far less common in high tunnels even though a few studies have confirmed the benefits. For instance, a study conducted of tunnels in Switzerland showed better spider mite control with *Phytoseiulus persimilis* when crops were misted (Linder et al., 2003b), possibly due to the reduction in temperature and increase in relative humidity (Linder et al., 2003). A study conducted in greenhouse cucumber crops showed that fogging favored *P. persimilis* while simultaneously reducing *T. urticae* populations (Zhang, 2003). While lethal humidity (LH50) is about 70% at 20°C for *N. fallacis* eggs (Croft et al., 1993), with a relative humidity of 50%, larval mortality of the species reaches 91.9% for individuals who are fed and 98.1% for those under starvation (Croft et al., 1993). *N. fallacis* thereby requires cooler and more humid conditions than those created under high tunnels and misting might procure these conditions.

Our aim was to test the efficacy of 1) a pollen supplement, 2) a banker plant, 3) misting and 4) a combination of these strategies for enhancing the performance of predatory mites in high tunnel raspberry crops in Quebec, Canada. A secondary aim was to estimate the cost of each strategy and compare it to the cost of conventional management, with acaricide applications.

Materials and methods

Experiment setting

High tunnel trials took place in 2014 and 2015 at the farms of two important berry growers in the greater Quebec City region in the province of Quebec (Canada): Ferme Onésime Pouliot in Saint-Jean-de-l'Île-d'Orléans (referred to hereafter as the 'Pouliot farm'; 46°55'23.3"N 70°57'59.6"W) and Les Productions horticoles Demers Inc. in Lévis (hereafter the 'Demers farm'; 46°42'16.2"N 71°19'58.3"W). One tunnel covered an area of 896 m² (8m x 112m) at the Pouliot farm, and 592 m² (8m x 74 m) at the Demers farm. One tunnel was used at the first farm and two tunnels were used for the tests at the second. Three rows of floricané fruiting red raspberry cv. 'Tulameen' were under cultivation in pots in each tunnel. Pouliot farm used 15L pots and Demers farm 10L pots. Sixteen plots of 100 fruiting canes were delimited on each farm (about 27 m²) at Pouliot farm and about 40 m² at Demers farm). Miticides were applied as needed, because

although we wanted to limit the number of chemical interventions as much as possible, these trials were conducted on plants belonging to commercial growers, for whom a high yield is essential.

Based on a previous study (Therriault et al., 2013), prior to trials, we set a threshold of three spider mite motiles/leaflet. For both years of this study, mite population densities were determined by in situ observations during spring and destructive sampling when raspberry plants were sufficiently developed to tolerate it (about June 5-10). From then on, 20 leaflets per plot were collected randomly twice (2014) or once (2015) a week, placed in re-sealable storage bag and stored in a 10°C cooler until counted in the laboratory. The number of TSSM and predatory mite motiles and eggs were then counted with a stereomicroscope. In 2015, a second monitoring, an *in situ* visual one, was done every week. Application cost of each treatment was also estimated.

The IPM strategies tested during this two-year study were a combination of *N. fallacis* introductions with one of the following techniques: the use of a cattail pollen based food supplement known as Nutrimite® (Biobest), *S. sorbifolia* as a banker plant, and misting of high tunnels. The combinations of strategies tested slightly differed depending on the year (2014 and 2015), as explained below.

2014 experiment

Mite populations were monitored from May 29 to September 8, 2014. Four treatments were tested, each replicated four times: #1: predators only (control) (P); #2: predators + supplement (PS); #3: predators + banker plants (PB) and #4: predators + banker plants + supplement (PSB). For treatments with banker plants, the density was two *S. sorbifolia* bushes per plot of 100 raspberry canes. Sorbaria plants were installed in plots on June 9 at both farms. A miticide, specifically the acaricide Acramite (active ingredient: bifenazate), was applied early in the season (June 11 – Pouliot, June 16 – Demers) for all treatments. Seven to 10 days afterwards, *N. fallacis* individuals were introduced (rate of 5 individuals /m²). At the same time the pollen supplement Nutrimite (BioBest) was applied for the first time (June 18 – Pouliot, June 26 – Demers), using the hand sprayer "Nutrigun" at a rate of 500g / ha. As the food supplement retains its nutritional quality for two weeks following its application (Biobest Ltd, 2013), second and third applications were made two and four weeks after the phytoseiid release. The spider mite specialist *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae) was released as needed for high densities

(hot spots) of *T. urticae* (Hoy, 2011c; Kazak et al., 2015) at an introduction rate of 25 individuals/ m².

Statistical analysis (2014)

In 2014, separate analyses were performed for each site because crop management differed between farms: miticide was applied once at the Pouliot farm, three times at the Demers'.

The experimental design was completely randomized with repeated measures using date as the repeated factor. The best covariance structure among observations taken across time on the same experimental unit was chosen based on the AIC criterion. The dependent variables (i.e. mean density of *T. urticae* and phytoseiids per leaflet) were log-transformed in order to approach the assumptions of the model. When appropriate, the baseline measurement was used as a covariate in the model. The Shapiro-Wilk's statistic was used to evaluate the normality assumption, while residuals' plots were used to investigate the homogeneity of variance. Slight departure of the normality assumption was sometimes observed, but since results were identical to those obtained by the Brunner et al. (2002) nonparametric approach for longitudinal data, the usual approach was retained. Analyses were performed using the Mixed procedure of SAS software (release 9.4, SAS Inc., NC) with a significance level of $\alpha=0.05$.

2015 experiment

In 2015, the experiment was monitored from May 26 to August 31, 2015. Four treatments were compared: #1: predators only (control) (P); #2: predators + supplement (PS); #3: predators + misting (PM) and #4: predators + supplement + misting (PSM). There were two introductions of *N. fallacis* at a lower rate than in 2014: 1 /m² on May 27 and June 10. The supplement Nutrimite (500g/ha) was applied twice, at the same time *N. fallacis* was released. Misting was operational from June 13 and was set to run from 10 a.m. to 4 p.m. on warm and sunny days. The misting system functioned for 25 seconds at intervals of 1 minute as soon as the temperature inside the tunnel rose above 27°C. A six-station irrigation controller (DIG 5006-1 model) with a 24V electrical valve was used to control misting, programmed to function for 25 seconds every minute at the Pouliot farm. As for the Demers farm, it was programmed to function for 3 seconds every minute during harvest time, to avoid heavy calcareous deposits on foliage and fruits. Two misting lines

were installed in the tunnels, between and parallel to raspberry rows, at a height of about 3 m. The misting system was set with with 2-way Tee Dan foggers type (Jain irrigation inc.) with 1.8GPH nozzles spaced 3 m apart. Droplet size was 90 microns at 58 PSI (Jain Irrigation, 2010). The foggers were oriented in the same direction as the rows, in order to avoid watering the raspberry plants directly. At both farms, water used for misting came from an irrigation lake. The miticide Acramite 50WS (a.i.: bifenazate) was applied on June 27 on the Pouliot farm (with miticide Apollo SC, a.i.: clofentezine) and June 30 at the Demers farm. Temperature and relative humidity (RH) data were recorded every 15 minutes by three HOBO data loggers in each tunnel and one outside the tunnels, for a total of 7 data loggers per site.

Because the incidence of gray mold caused by *Botrytis cinerea* Pers. was a concern in misted tunnels, four random samples of 100 fruits per tunnel (n = 800) were taken at the Demers farm between September 10 and September 21, 2015. The fruits collected were examined visually for the presence or absence of *B. cinerea* (observation of conidiophore sporulation (Agrios, 2004) and/or other signs of the fungus itself).

Statistical analysis (2015)

Data from both growers were combined for the 2015 population analyses. For that experiment, the experimental design was a split-plot design with repeated measures, with misting in the main plots, supplement in the subplots and date as the repeated factor. The best covariance structure among observations taken across time on the same experimental unit was chosen based on the AIC criterion. All analyses were performed with a significance level of $\alpha=5\%$.

For the two-spotted spider mite population analysis, a generalized linear mixed model was fitted to the data using a negative binomial distribution with the default log link function. This was done because there were many zeros in the data (no TSSM observed). This analysis was performed using the Glimmix procedure of SAS software (release 9.4, SAS Inc., NC).

For the phytoseiid population analysis, a normal linear mixed model was fitted to the data. The dependent variables (i.e. mean density of phytoseiids per leaflet) were log-transformed in order to meet the assumptions of the model. The Shapiro-Wilk's statistic was used to evaluate the normality assumption, while residuals' plots were used to

investigate the homogeneity of variance. Analyses were performed using the Mixed procedure of SAS software (release 9.4, SAS Inc., NC).

Results

2014 experiment

In 2014, the TSSM data showed a significant difference between treatments ($F = 3.71$; $df = 3, 12$; $p = 0.0425$) at the Pouliot farm. The P and PB treatments were equivalent, as were the PS and PSB treatments (**Error! Reference source not found.**). For the P and PB treatments, the mean density of spider mite motiles was $1.07 (\pm 1.42)$ per leaflet; for the PS and PSB treatments, the mean density was $0.61 (\pm 0.85)$. The highest number of TSSM was reached in the P treatment (control), with an average of $6.71 (\pm 11.34)$ motiles per leaflet on August 5 (**Error! Reference source not found.**). On that date, two plots under the P treatment had very high mean numbers of *T. urticae*: $11.90 (\pm 17.01)$ and $26.35 (\pm 18.28)$ (data not shown). For the other treatments, only PSB exceeded the threshold of 3 motiles/leaflet, but for a very short time, reaching $3.46 (\pm 3.49)$ motiles/leaflet on August 1, before the mean spider mite population dropped to $3.00 (\pm 5.14)$ and then to $0.88 (\pm 1.20)$ motiles/leaflet within the next week (**Error! Reference source not found.**).

As for phytoseiid densities, there was also a significant difference between treatments ($F = 8.97$; $df = 3, 12$; $p = 0.0022$) with the same pattern as for spider mites; the P and PB treatments were equivalent, as were the PS and PSB treatments (**Error! Reference source not found.**). For the P and PB treatments, the mean density of phytoseiid motiles was $0.30 (\pm 0.37)$ per leaflet; for the PS and PSB treatments, the mean was $0.25 (\pm 0.27)$. The highest average of phytoseiid motiles/leaflet was $1.28 (\pm 2.35)$, obtained on July 25 in the control treatment. At the Pouliot farm, a total of three *P. persimilis* introductions were made during the season: July 25, August 1 and August 8. According to TSSM densities, because plots didn't have the same pest pressure, no *P. persimilis* was introduced in the PS treatment plots, one introduction was made in PSB treatment plots (July 25) and two introductions in P and PB treatments (August 1 and August 8). The *P. persimilis* introduction rate was a curative one: 25/m² (Biobest Canada Ltd, 2015a, 2015b). The average size of mite populations (*T. urticae*, *N. fallacis* and *P. persimilis*) at the Pouliot farm is shown in **Error! Reference source not found.**, which

shows that very few *P. persimilis* individuals were found, with a mean density of 0.01 (\pm 0.02) motiles per leaflet.

Table 2 shows the estimated cost for each treatment. Plots with the PS treatment harbored the lowest densities of spider mites ($t = -7.66$; $df = 12$; $p < 0.0001$), compared to treatments P and PB, and also had the lowest estimated cost (\$2709 / ha), 24 to 36% lower than that of the other treatments tested (\$ 3551, \$ 4233 and \$4262 / ha) (Table 2).

On the Demers farm, we found no treatment effect on either density of predatory ($F = 2.56$; $df = 3, 12$; $p = 0.1082$) or spider mites ($F = 0.48$; $df = 3, 12$; $p = 0.7009$). For all treatments, the mean density of *N. fallacis* motiles per leaflet varied from 0.00 to 2.05 (\pm 0.61). The highest average size of the phytoseiid motile populations was 4.14 (\pm 3.29), reached on July 22 in the control treatment. As for TSSM, the mean density of motiles per leaflet varied from 0.03 to 9.94 (\pm 3.41). The maximum average number of TSSM individuals was also reached on July 22, but in the PSB treatment, with 14.77 (\pm 10.03) motiles per leaflet (data not shown). At the Demers farm, there were also three *P. persimilis* introductions made on July 10, July 16 and July 29 (data not shown). The *P. persimilis* population pattern was the same as that found on the Pouliot farm, very few individuals were scouted: the mean density of motiles varied between 0.00 and 0.29 (\pm 0.10).

2015 experiment

In 2015, banker-plants in the PB and PSB treatments were replaced by misting (PM and PSM treatments). Data from both farms were combined for analyses. Results showed that misting had a negative effect on TSSM densities (Misting * Date interaction ($F = 6.86$; $df = 14, 371$; $p < 0.0001$)) (

Table 3 and **Error! Reference source not found.**). Both Misting only ($F = 2.94$; $df = 1$, 27.18; $p = 0.0979$) and Misting*Food supplement*Date interaction ($F = 1.63$; $df = 14$, 371; $p = 0.0697$), could be considered “almost significant”. The mean density of spider mites peaked on June 23 in the PM and PSM treatments (**Error! Reference source not found.**). On that date, in the PM treatment, the mean density was $4.60 (\pm 3.56)$ motiles per leaflet, while in the PSM treatment it was $6.96 (\pm 4.37)$ (data from the Pouliot farm only: not shown). A miticide application (Acramite 50WS, a.i.: bifenazate) was done, and TSSM populations crashed within one week. For the entire monitoring period, both farms combined, the mean density of TSSM was $0.30 (\pm 0.60)$ motiles per leaflet.

However, no treatment seemed to influence predator densities: Misting (PM) ($F = 0.55$; $df = 1$, 361; $p = 0.5941$), Supplement (PS) ($F = 0.17$; $df = 1$, 361; $p = 0.6765$) and Misting*Supplement interaction ($F = 0.06$; $df = 1$, 361; $p = 0.8044$) showed no significant differences. The highest mean density of phytoseiids reached on the combined sites data was $1.6 (\pm 0.55)$ on July 21 in the control treatment (P) at the Pouliot farm. Predatory mite population means (all treatments) were low during spring, until about June 30, with an average of $0.061 (\pm 0.09)$, and they rose after that date to hover around an average of $0.438 (\pm 0.45)$ until September (**Error! Reference source not found.**). Data from both farms showed that the mean density of phytoseiid mites from May 26 to August 31 was $0.26 (\pm 0.23)$ motiles per leaflet. On July 14, the predator *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidea) (10/m²) was introduced in all plots at both farms.

At the Pouliot farm, misting maintained relative humidity about 7% higher during August between 10 a.m. and 4 p.m., the interval during which the equipment was in operation (**Error! Reference source not found.**). The average RH % for that month was $64.247\% (\pm 0.44)$ in the non-misted tunnel and $71.023\% (\pm 0.36)$ in the misted one. The average August temperature between 10 a.m. and 4 p.m. was a little hotter in the non-misted tunnel ($28.00^{\circ}\text{C} \pm 0.16$) than in the misted one ($26.72^{\circ}\text{C} \pm 0.13$). At the Demers farm, during the month of August, between 10 a.m. and 4 p.m., the relative humidity in the misted tunnel ($66.372\% \pm 0.45$) was a little more than 3% higher than in the non-misted tunnel ($63.007\% \pm 0.50$) (figure 7). The mean temperature for the same month and interval was $26.82^{\circ}\text{C} (\pm 0.16)$ in the misted tunnel and $27.23^{\circ}\text{C} (\pm 0.17)$ in the non-misted one (data not shown). However, the implementation of misting can be expensive: \$ 1953 / ha. The treatments associated with its use (PM and PSM) have a higher total cost (\$ 3945 and

\$ 4545 / ha) than those using predators only (\$ 1767 / ha) or predators and food supplement (\$ 2367 / ha) (Table 4).

There was no difference in *Botrytis cinerea* prevalence between misted and non-misted tunnels (**Error! Reference source not found.**): 111/400 fruits showed a sign of grey mold in the misted tunnel and 115/400 in the non-misted one. Botrytis prevalence was only measured at the Demers farm. However, growers from both farms made anecdotal observations that fruits appeared more soft in misted tunnels compared to fruits from un-misted tunnels. Nonetheless, they did not notice any impact on yields.

Discussion

In recent years, numerous studies using food supplements for phytoseiid mites found evidence that pollen applications can indeed enhance predatory mite population development (e.g. (Delisle et al., 2015; Duarte et al., 2015; Goleva and Zebitz, 2013; Janssen and Sabelis, 2015). The banker plant technique also appeared promising for establishing phytoseiid mites and lowering the cost of biological control (Huang et al., 2011; Li et al., 2015; Messelink et al., 2014). Additionally, temperature and humidity conditions created by misting might in fact promote predatory mite development at the expense of spider mites (Croft et al., 1993; De Courcy Williams et al., 2004; Linder et al., 2003b). In direct line with these affirmations, we wanted to examine strategies that could enhance biological control and reduce the cost of its application, making it feasible and attractive for berry growers using tunnels. Our study suggests that a feasible solution for biological control of *T. urticae* in high tunnel raspberry production would be to combine an early and low-rate introduction of *N. fallacis* with use of a food supplement and misting. The banker plant we tested, *S. sorbifolia*, showed no ability to enhance the phytoseiid mite population in our system.

Phytoseiid mite introductions

Fewer phytoseiid mites have been introduced in testing tunnels in 2015 than in 2014, reducing the costs associated with this technique by the same time. The two early introductions of *N. fallacis* at a preventive rate of 1-2/m² in 2015 were more effective at controlling spider mites than the late and much curative rate of 5-6/m² in 2014. The preventive method of phytoseiid introduction shows potential for controlling two-spotted spider mite populations.

Our tests being conducted at commercial growers, it was imperative to keep spider mite populations as low as possible, so that our plots would not become infestation sources for nearby tunnels. We used phytoseiid mites, other than *N. fallacis*, to avoid any miticide applications during the growing season. In order to do so, we performed curative introductions with *P. persimilis* in 2014 and a preventive release with *N. californicus* in 2015.

We opted for *Phytoseiulus persimilis* in 2014 tests because of its high specificity toward *T. urticae* (McMurtry and Croft, 1997; McMurtry et al., 2013; Zhang, 2003). *Phytoseiulus persimilis* was released only on spider mite hot spots, at a curative rate of 25/m². Despite three releases of *P. persimilis* at a high rate, the predator did not perform well (**Error! Reference source not found.**). Very few individuals were found through our monitoring. There are two possible explanations for those results: either there was not enough prey and/or the temperature and humidity conditions found under cultivation tunnels were not favorable to *P. persimilis*. Considering the climatic conditions created by high tunnels, we decided to make preventive introductions, if needed, of *N. californicus* for the 2015 season tests. Compared to *P. persimilis*, *N. californicus* is known to be more tolerant to a wide range of temperatures and relative humidity and exert a better control of TSSM when populations are low (De Courcy Williams et al., 2004; Ferrero et al., 2010; Gerson and Weintraub, 2007; Gotoh et al., 2004). As stated by Castaglioni and Simoni (1994), when compared to *P. persimilis*, *N. californicus* showed a higher tolerance to temperatures over 30°C. We did not wait to reach a threshold before introducing the “back-up” *N. californicus* phytoseiids; the release was strictly preventive.

The replacement of *P. persimilis* by *N. californicus* also had an influence on lowering phytoseiid introduction costs in 2015; not only *P. persimilis* starve without enough prey, resulting in many needed introductions (Messelink et al., 2014), but the basic cost of *N. californicus* is lower than *P. persimilis*.

Food supplement

The possibility that *N. fallacis*, a selective predator of tetranychid (McMurtry et al., 2013), could feed on a new commercially available pollen-based supplement (Nutrimite® from Biobest) was open to question and merited investigation. To our knowledge, our

study was the first to document the use of cattail pollen (*Typha angustifolia*) as food supplement to *N. fallacis* in a field study. In Gugole Ottaviano et al. (2015), they tested pollen from several wild plants in the surrounding of strawberry crops and found that these pollen sources alone would not allow the reproduction of *N. californicus*, but would improve its persistence when prey is low, therefore limiting *T. urticae* growth when it starts colonizing the crop. While supplementing natural pollen into a crop may also encourage the increase of other pests such as thrips (e.g., Vangansbeke et al., 2015), we did not observe such phenomenon in our system.

Our findings suggest that cattail pollen can indeed enhance the predatory capacity of *N. fallacis* but this effect was only found in 2014 and not in 2015. In 2015, we did two applications of Nutrimite instead of three in 2014 (as a mean to reduce the cost). The additional application made in 2014 may have therefore contributed to longer persistence of the predators, as seen in Gugole Ottaviano et al. (2015). The results we found on the effect of the food supplement differed not only between the years but also between the two farms. For instance, no effect was found at the Demers farm in neither year. At the Pouliot farm, we found a fairly constant and persistent population of phytoseiid mites although very few prey were present (**Error! Reference source not found.**). On the Demers farm, miticides had to be applied at three different times during the growing season in order to control the spider mite population. Therefore, we believe that this site yielded less conclusive results due to the impact of multiple miticide applications.

A previous study (Therriault et al., 2013) conducted in Quebec under very similar conditions (*i.e.* phytoseiid introductions against TSSM in high tunnel raspberries) recommended miticide application followed by introduction of phytoseiid mites. We followed this recommendation in 2014, but, with the objective of reducing biological control costs, we decided to do the opposite in 2015. Thus, in 2015, we introduced *N. fallacis* three weeks earlier than 2014, at a lower rate ($1/m^2$), and waited to see if an application of miticide was needed. An acaricide was indeed required, but *N. fallacis* was well established at that point and the pesticide barely affected the phytoseiid population (**Error! Reference source not found.**). We found that this new strategy, *i.e.* to introduce phytoseiids early in season and wait before applying a miticide, appear to yield better results than the one recommended by Therriault et al. (2013). In 2014, the *N. fallacis* individuals were released at a higher rate after the miticide application and it took almost a month to really observe the predator's presence (**Error! Reference source not found.**).

In the end, with the new strategy, the costs associated with the PS treatment (predators + food supplement) were reduced by 13% in 2015 (Table 4) compared to 2014 (Table 2). Introducing *N. fallacis* in prevention as we did in 2015 (1/m²) cost about the same as one miticide application. While the Nutrimite® supplement is still newly commercially available in Canada (since 2014), its cost may decrease with time.

Finally, further work will be needed to determine the optimal timing for the application of pollen supplement in high tunnel raspberry. Optimizing the spraying method of the pollen on the crop foliage is also needed. While the Nutrigun® (Biobest) was effective at applying the pollen on small plots, we anticipate that it may not be the case for larger areas. In a study using pollen covered rayon-jute twine, *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) population doubled in 2-3 weeks (Adar et al., 2014). Those twines provided shelter and alternative food for introduced phytoseiids in pepper plants (Adar et al., 2014). It would be interesting to test the “on-twine” technique with Nutrimite in raspberries as this could help lowering the costs of that technique.

Banker plant

In our system, *Sorbaria sorbifolia* demonstrated no measurable advantages in 2014 as a banker plant although a previous study by Authier et al. (2012) found potential for this species as banker plant in ornamental nurseries.

The banker plants themselves were the component associated with the lowest costs in our study (table 1). Moreover, the cost of sorbaria shrubs was amortized over four years, although they might live longer in good conditions. Therefore, the addition of sorbarias was less expensive than the application of food supplement and misting system (tables 1 and 3). However, more phytoseiids introductions (or the same number) were made in banker plant treatments during our experiment. While the use of the banker plant technique should reduce the cost of phytoseiid introductions (Frank, 2010; Huang et al., 2011; Parolin et al., 2010), we did not achieve this with sorbarias.

In nature, phytoseiids are more abundant on plants with pubescent leaves because they provide shelter for acarine predators (Adar et al., 2014; Roda et al., 2000). Thus, raspberry plants may provide a better shelter to phytoseiids when compared with *Sorbaria sorbifolia*; raspberry leaves are rather pubescent while *S. sorbaria* ones are much more glabrous (M. St-Laurent, personal observation). That might explain the rarely presence of

N. fallacis on *S. sorbifolia* during monitoring (data not shown) and the absence of effect of this shrub as a banker plant. However, banker plants works well in various cultures and against many pests (Frank, 2010; Huang et al., 2011). Despite our disappointing results with sorbaria, further effort should be conducted to find an adequate “banker plant + raspberry + phytoseiids” combination for high tunnel raspberry cropping system.

Because our aim was to develop a method that could be rapidly applicable and transferable to growers, rather than continuing with a method that showed little promise upon testing, we opted in 2015 to test the potential of misting as a mean to enhance the biological control of TSSM.

Misting

Our results suggest that high tunnel misting can have negative impact on spider mite populations. However, the mechanisms involved are unclear. On June 23, the spider mite population was rather high in the misting treatment (figure 4). We speculate that this is due to the contamination of some of our plots through the predator introductions, as we have purchased them on bean leaves on which there were also two-spotted spider mites. Even so, phytoseiid mites were able to effectively control spider mites by the end of August in the misted tunnel. Except for the short period of contamination, all treatments maintained the spider mite population below the threshold of 3 spider mite motiles/ leaflet (**Error! Reference source not found.**). Our result is similar to that demonstrated by a Swiss study with phytoseiids against *T. urticae* in raspberry tunnels: the phytoseiid population is not greater in the misted tunnel (Linder et al., 2003b).

The relative humidity of misted and non-misted tunnels differed between farms for the hotter month (August) for the same time period (between 10 a.m. and 4 p.m.). Indeed, in the misted tunnel, the mean RH was 71.023% (± 0.36) at the Pouliot farm while it was 66.372% (± 0.45) at the Demers'. In the non-misted tunnels, the RH difference is slighter: 64.247% (± 0.44) at the Pouliot farm and 63.007% (± 0.50) in the Demers tunnel. At the Demers farm, heavy calcareous deposits from misting water tended to cover foliage and fruits; we had to reduce the misting programming to a minimum (3 seconds/minute) in order to avoid declassification (associated with misting) of the fruits. After harvesting (August 23), the misting programming at the Demers farm returned to the same level (25 seconds/minute) as at the Pouliot farm. We can therefore say that the misting duration had an impact on the relative humidity inside the tunnel. The prevalence of gray mold, *Botrytis*

cinerea, in the misted tunnels was an important concern for the misting trials of 2015. One of the greatest advantages of tunnel raspberry production over in-field production being the reduction in disease (Demchak and Hanson, 2013; Funt and Hall, 2013; Heidenreich et al., 2012), we did not want to promote gray mold through misting. After the harvest, the fruits that remained on plants were collected, and visual examination failed to show any difference in gray mold occurrence between fruit in misted and non-misted tunnels (figure 8). Our results corroborate the results obtained by Linder et al. (2003b) in high tunnels in Switzerland.

Because misting is not currently a common technique used by high tunnel producers, there is no misting equipment especially made for high tunnels. We did purchase and install a system based with what already existed for greenhouses. In our calculations, the cost of the misting equipment was amortized over ten years, although it could possibly last longer. However, growers might not have to invest as large a sum as we did for this study, as they may already have most of the material to build a “homemade” misting system.

Testing of misting during hot summers with a much higher TSSM population than we had in 2015 would be required. Indeed, climatic conditions in 2015 were not ideal to conduct misting trials: spring was rainy and summer not so hot, that might have impact the results of our study. We recommend further study with misting, as the technique did not seem to be optimally developed. Specifically, an effective misting protocol for tunnels would require optimization of the fogger density, water pressure provided, evaluation of droplets size, water quality and programming (misting intervals).

Conclusion

In summary, this study provides evidence that biological control of *T. urticae* with *N. fallacis* can be improved in high tunnel raspberry production. In addition to a food supplement and misting, other integrated pest strategies can be implemented to facilitate *N. fallacis* establishment. For instance, we found that an early in season and low rate introduction of phytoseiids can benefit the predators while representing a low cost approach. If a miticide treatment is required later in the season, *N. fallacis* will be more likely to survive it because its population will be built up (T. Chouffot, pers. comm.). Repeated introductions of an indigenous phytoseiid species, such as *N. fallacis*, on a farm are also important for enhancing biological control: the more years of introductions, the

bigger and earlier the predator population will be in the crop. As demonstrated by Greco et al. (2005), the initial relative densities of prey/predator have an important effect on system dynamics and the conservation of phytoseiids may result in early control of *T. urticae*. Predatory mite release direct costs are higher than pesticides, but if the two-spotted spider mite population shows resistance to registered pesticides, this may be the only management option. While pesticides applications appear to be cheaper, important indirect costs are associated with that management, including the cost of losing an effective miticide to resistance (e.g. Acramite), negative effects on the environment and detrimental impact on workers' health and others (Hoy, 2011b; Pimentel and Burgess, 2014; Pimentel et al., 1980). Biological control would therefore be justified in a high-value crop such as high tunnel raspberries. The strategies investigated in this study, in varying combinations, are all feasible for perennial crop growers, which may make biological control methods as more attractive alternative.

Acknowledgements

This study was supported by a grant from the Prime-Vert volet 4 – Appui au développement et au transfert de connaissances en agroenvironnement of the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). The authors are grateful to Jenny Leblanc (MAPAQ) and the staff from Ferme Onésime Pouliot and Productions horticoles Demers for their support and time. We are thankful to Thierry Chouffot (Koppert Biological Systems), Sébastien Jacob (Biobest Biological Systems) and Olivier Noël (Anatis Bioprotection) for technical supplies and helpful advice on predators. Finally, our thanks to Gaétan Daigle (Laval University, Québec, Canada) for his help with statistical analyses, as well as Olivier Samson-Robert, Phanie Bonneau, Noémie Brisson, Jérôme Ouellet, Sandra Savard and Stéphane Thibault for their technical assistance.

References

- Adar, E., Inbar, M., Gal, S., Gan-Mor, S., Palevsky, E., 2014. Pollen on-twine for food provisioning and oviposition of predatory mites in protected crops. *BioControl* 59, 307-317.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007. Profil de la culture de la framboise au Canada.
- Agrios, G.N., 2004. Plant pathology, 5 th editi. ed. Elsevier Academic Press.

- Ahlstrom, K.R., Rock, G.C., 1973. Comparative Studies on *Neoseiulus fallacis* and *Metaseiulus occidentalis* for Azinphosmethyl Toxicity and Effects of Prey and Pollen on Growth. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 66, 1109-1113. doi:<http://dx.doi.org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1093/aesa/66.5.1109>
- Allen, G., Halsall, C.J., Ukpebor, J., Paul, N.D., Ridall, G., Wargent, J.J., 2015. Increased occurrence of pesticide residues on crops grown in protected environments compared to crops grown in open field conditions. *Chemosphere* 119, 1428-1435.
- Applied Bio-nomics Ltd, 2015a. *Amblyseius (Neoseiulus) fallacis*; Spider Mite Predator Technical Manual, Sheet 201 - Fallacis.
- Applied Bio-nomics Ltd, 2015b. *Persimilis (Phytoseiulus persimilis)*; Two-spotted Mite Predator Technical Manual, Sheet 200 - Persimilis.
- Argov, Y., Berkeley, M., Domeratzky, S., Melamed, E., Weintraub, P., Palevsky, E., 2006. Identification of pollens for small scale mass rearing of *Neoseiulus californicus* and a novel method for quality control. *IOBC/wprs Bull.* 29, 127-132.
- Audenaert, J., Vangansbeke, D., Verhoeven, R., De Clercq, P., Tirry, L., Gobin, B., 2014. The influence of variable temperature and humidity on the predation efficiency of *P. persimilis*, *N. californicus* and *N. fallacis*. *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci.* 79, 117-122.
- Auger, P., Tixier, M.S., Kreiter, S., Fauvel, G., 1999. Factors affecting ambulatory dispersal in the predaceous mite *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 23, 235-250. doi:10.1023/A:1006019014708
- Authier, N., 2011. Évaluation du *Sorbaria sorbifolia* comme plante réservoir de prédateurs naturels dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points (No. Numéro de projet: 1508), Rapport d'étape.
- Authier, N., Lemaire, É., Rochefort, S., 2012. Évaluation du *Sorbaria sorbifolia* comme plante réservoir de prédateurs naturels dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points (No. Numéro du projet: 1508), Rapport Final.
- Baeza, E.J., Stanghellini, C., Castilla, N., 2013. Protected cultivation in Europe. *Acta Hort.* 987, 11-28.
- Beaulieu, F., Neven, L., Vega, H.E., 2014. Morphological Identification of Spider Mites (Tetranychidae) Affecting Imported Fruits. Ottawa, Canada.
- Berry, J.S., Holtzer, T.O., 1990. Ambulatory Dispersal Behavior of *Neoseiulus fallacis* (Acarina: Phytoseiidae) in Relation To Prey Density and Temperature. *Exp. Appl. Acarol.* 8, 253-274. doi:10.1007/BF01202136
- Biobest Canada Ltd, 2015a. *Phytoseiulus persimilis* Acarien prédateur des tétranyques. Leamington, Canada.
- Biobest Canada Ltd, 2015b. Auxiliaires pour lutter contre les tétranyques.
- Biobest Ltd, 2013. Fiche de produit NUTRIMITE. Westerlo, Belgique.
- Biobest Ltd, 2015a. *Amblyseius californicus* Acarien prédateur des tétranyques et autres acarins. Leamington, Canada.
- Biobest Ltd, 2015b. Contrôle biologique: Auxiliaires [WWW Document]. URL <http://www.biobestgroup.com/fr/biobest/produits/controle-biologique-4459/> (consulté le 11.22.15).
- Borsa, P., Kjellberg, F., 1996. Secondary sex ratio adjustment in a pseudo-arrhenotokous insect, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). *Life Sci.* 319, 1159-1166.

- Bostanian, N.J., Hardman, J.M., Thistlewood, H. a, Racette, G., 2010. Effects of six selected orchard insecticides on *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) in the laboratory. *Pest Manag. Sci.* 66, 1263-7. doi:10.1002/ps.2010
- Both, a J., 2008. Greenhouse Temperature Management. *Greenh. Energy Cost Reduct. Strateg.* 1-4.
- Brown, D., Hanson, E., 2014. Framboisiers cultivés en pot dans un abri-serre [WWW Document]. Ministère l'Agriculture, l'Alimentaion des Aff. Rural. URL <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/allontario/ao0314a2.htm> (consulté le 3.6.16).
- Brunner, E., Domhof, S., Langer, F., 2002. Nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Bushway, L., Pritts, M., Handley, D., 2008. Raspberry and Blackberry Production Guide for the Northeast, Midwest, and Eastern Canada. NRAES, Ithaca, NY.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., 2005. *Biology*, 7th editio. ed. Pearson Education.
- Caron, J., Laverdière, L., Roy, M., 2000. Guide de lutte intégrée contre les tétranyques dans la production de la framboise. Horti-Protection inc.
- Castaglioni, M., Simoni, S., 1994. The effect of different constant humidities on eggs and larvae of *Amblyseius californicus* (McGregor) (Acarina: Phytoseiidae). *Redia* 3, 349-359.
- Castilho, R.C., Duarte, V.S., de Moraes, G.J., Westrum, K., Trandem, N., Rocha, L.C.D., Delalibera, I., Klingen, I., 2015. Two-spotted spider mite and its natural enemies on strawberry grown as protected and unprotected crops in Norway and Brazil. *Exp. Appl. Acarol.* 66, 509-528. doi:10.1007/s10493-015-9913-4
- Chant, D. a., 1959. Phytoseiid Mites (Acarina: Phytoseiidae). *Mem. Entomol. Soc. Canada* 91, 5-166. doi:10.4039/entm9112fv
- Connellan, G.J., 2002. Selection of greenhouse design and technology options for high temperature regions. *Acta Hortic.* 578, 113-117.
- CPVQ, 1997. *Petits fruits : culture*. Québec.
- Croft, B. a., Croft, M.B., 1993. Larval survival and feeding by immature *Metaseiulus occidentalis*, *Neoseiulus fallacis*, *Amblyseius andersoni* and *Typhlodromus pyri* on life stage groups of *Tetranychus urticae* Koch and phytoseiid larvae. *Exp. Appl. Acarol.* 17, 685-693. doi:10.1007/BF00058508
- Croft, B. a., Messing, R.H., Dunley, J.E., Strong, W.B., 1993. Effects of humidity on eggs and immatures of *Neoseiulus fallacis*, *Amblyseius andersoni*, *Metaseiulus occidentalis* and *Typhlodromus pyri* (Phytoseiidae): implications for biological control on apple, caneberry, strawberry and hop. *Exp. Appl. Acarol.* 17, 451-459. doi:10.1007/BF00120503
- Croft, B.A., Jung, C., 2001. Phytoseiid dispersal at plant to regional levels: A review with emphasis on management of *Neoseiulus fallacis* in diverse agroecosystems. *Exp. Appl. Acarol.* 25, 763-784.
- Croft, B.A., Monetti, L.N., Pratt, P.D., 1998. Comparative life histories and predation types : are *Neoseiulus californicus* and *N . fallacis* (Acari : Phytoseiidae) similar Type II selective predators of Spider Mites ? *Environ. Entomol.* 27, 531-538.
- De Courcy Williams, M., Kravar-garde, L., Fenlon, J., Sunderland, K., 2004. Phytoseiid mites in protected crops: the effect of humidity and food availability on egg hatch and

- adult life span of *Iphiseius degenerans*, *Neoseiulus cucumeris*, *N. californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 32, 1-13.
- Delisle, J.F., 2014. Évaluation de suppléments alimentaires pour deux espèces d'acariens prédateurs, *Amblyseius swirskii* et *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) pour l'optimisation du contrôle biologique du thrips des petits fruits (*Frankliniella occidentalis*). Université de Montréal.
- Delisle, J.F., Brodeur, J., Shipp, L., 2015. Evaluation of various types of supplemental food for two species of predatory mites, *Amblyseius swirskii* and *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 483-494.
- Demchak, K., Hanson, E.J., 2013. Small fruit production in high tunnels in the US. *Acta Hort.* 987, 41-44.
- Demite, P.R., McMurtry, J.A., De Moraes, G.J., 2014. Phytoseiidae Database: a website for taxonomic and distributional information on phytoseiid mites (Acari). *Zootaxa* 3795, 571-577.
- Duarte, M.V.A., Venzon, M., Bittencourt, M.C. de S., Rodríguez-Cruz, F.A., Pallini, A., Janssen, A., 2015. Alternative food promotes broad mite control on chilli pepper plants. *BioControl* 60, 817-825. doi:10.1007/s10526-015-9688-x
- Edin, M., Gaillard, P., Massardier, P., 1999. *Le Framboisier*, Centre tec. ed. Paris.
- Ferreira, C.B.S., Andrade, F.H.N., Rodrigues, A.R.S., Siqueira, H. a. a., Gondim, M.G.C., 2015. Resistance in field populations of *Tetranychus urticae* to acaricides and characterization of the inheritance of abamectin resistance. *Crop Prot.* 67, 77-83. doi:10.1016/j.cropro.2014.09.022
- Ferrero, M., Gigot, C., Tixier, M.S., van Houten, Y.M., Kreiter, S., 2010. Egg hatching response to a range of air humidities for six species of predatory mites. *Entomol. Exp. Appl.* 135, 237-244.
- Frank, S.D., 2010. Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. *Biol. Control* 52, 8-16.
- Frère Marie-Victorin, É.C., Rouleau, E., Brouillet, L., 2002. *Flore laurentienne*, 3e Édition. ed. Chenelière Éducation, Montréal, Canada.
- Funt, R.C., Hall, H.K., 2013. *Raspberries*, Series: Cr. ed. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK. doi:10.1079/9781845937911.0000
- Gerson, U., Weintraub, P.G., 2007. Mites for the control of pests in protected cultivation. *Pest Manag. Sci.* 63, 658-676. doi:10.1002/ps.1380
- Goleva, I., Zebitz, C.P.W., 2013. Suitability of different pollen as alternative food for the predatory mite *Amblyseius swirskii* (Acari, Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 61, 259-283.
- Gotoh, T., Yamaguchi, K., Mori, K., 2004. Effect of temperature on life history of the predatory mite *Amblyseius (Neoseiulus) californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 32, 15-30. doi:10.1023/B:APPA.0000018192.91930.49
- Greco, N.M., Sánchez, N.E., Liljeström, G.G., 2005. *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) as a potential control agent of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): Effect of pest/predator ratio on pest abundance on strawberry. *Exp. Appl. Acarol.* 37, 57-66. doi:10.1007/s10493-005-0067-7
- Gugole Ottaviano, M.F., Cédola, C. V., Sánchez, N.E., Greco, N.M., 2015. Conservation biological control in strawberry: effect of different pollen on development, survival, and

- reproduction of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 507-521. doi:10.1007/s10493-015-9971-7
- Hajek, A.E., 2004. *Natural Enemies An Introduction to Biological Control*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hauser, M., 2011. A historic account of the invasion of *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drosophilidae) in the continental United States, with remarks on their identification. *Pest Manag. Sci.* 67, 1352-1357. doi:10.1002/ps.2265
- Heidenreich, C., Pritts, M., Demchak, K., Hanson, E., Weber, C., Kelly, M.J., 2012. *High Tunnel Raspberries and Blackberries, High Tunnel Raspberries ans Blackberries*. Department of Horticulture Publication, Cornell University, Cornell, Canada.
- Helle, W., Sabelis, M.W., 1985a. *Spider Mites. Their Biology, Natural Enemies and Control*. Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam-New York.
- Helle, W., Sabelis, M.W., 1985b. *Spider Mites. Their Biology, Natural Enemies and Control*. Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam-New York.
- Holtzer, T.O., Norman, J.M., Perring, T.M., Berry, J.S., Heintz, J.C., 1988. Effects of microenvironment on the dynamics of spider-mite populations. *Exp. Appl. Acarol.* 4, 247-264. doi:10.1007/BF01196189
- Hoy, M.A., 2011a. Chapter 6. Tetranychidae: Premier Plant Pests, in: *Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*. Boca Raton: CRC Press, 2011. (Éd.), p. 85-102.
- Hoy, M.A., 2011b. Chapter 5. The strategy of Integrated Mite Management, in: *Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*. Boca Raton: CRC Press, 2011. (Éd.), p. 47-81.
- Hoy, M.A., 2011c. Chapter 12. The Phytoseiidae: Effective Natural Enemies, in: *Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2011. (Éd.), p. 159-183.
- Hoy, M.A., 2011d. *Agricultural acarology: Introduction to integrated mite management*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- Huang, N., Enkegaard, A., Osborne, L.S., Ramakers, P.M.J., Messelink, G.J., Pijnakker, J., Murphy, G., 2011. The Banker Plant Method in Biological Control. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 30, 259-278. doi:10.1080/07352689.2011.572055
- Huffaker, C.B., van de Vrie, M., McMurtry, J.A., 1969. The ecology of tetranychid mites and their natural control. *Annu. Rev. Entomol.* 14, 125-174.
- Huot, F., 2012. *Sorbaria sorbifolia*: en pépinière cette « plante réservoir » a-t-elle un grand potentiel dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points? *Québec Vert* 88-91.
- Jain Irrigation, 2010. Dan Fogger/Mister [WWW Document]. Jain Irrig. Inc. URL https://www.jainsusa.com/wp-content/downloads/2015/Brochures/foggers_misters.pdf (consulté le 4.27.16).
- Janssen, A., Sabelis, M.W., 2015. Alternative food and biological control by generalist predatory mites: the case of *Amblyseius swirskii*. *Exp. Appl. Acarol.* 65, 413-418. doi:10.1007/s10493-015-9901-8
- Jeppson, L.R., Keifer, H.H., Baker, E.W., 1975. *Mites injurious to economic plants*, Florida Entomologist. University of California Press, Berkeley, CA, USA.
- Johnson, D.T., Croft, B. a, 1976. *Laboratory Study of the Dispersal Behavior of*

- Amblyseius fallacis* (Acarina: Phytoseiidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 69, 1019-1023.
- Jung, C., Croft, B.A., 2000. Survival and plant-prey finding by *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) on soil substrates after aerial dispersal. Exp. Appl. Acarol. 24, 579-596.
- Jung, C., Croft, B.A., 2001. Aerial dispersal of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae): estimating falling speed and dispersal distance of adult females. Oikos 94, 182–190. doi:10.1034/j.1600-0706.2001.11044.x
- Kain, D.P., Nyrop, J.P., 1995. Tree Fruit Crops Insect Identification Sheet No.123.
- Kazak, C., Karut, K., Doker, I., 2015. Indigenous populations of *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae): single and combined releases against *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on greenhouse eggplant. Int. J. Acarol. 41, 108-114. doi:10.1080/01647954.2015.1008570
- Kennett, C.E., Flaherty, D.L., Hoffman, R.W., 1979. Effect of wind-borne pollens on the population dynamics of *Amblyseius hibisci* (Acarina: Phytoseiidae). Entomophaga 24, 83-98. doi:10.1007/BF02377513
- Lacroix, C., Harnois, M., 2013. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 4 – Petits fruits – 8 mai 2013. Québec.
- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G., 2015a. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 4 – Petits fruits – 1er mai 2015. Québec.
- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G.-A., 2015b. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 13 – Petits fruits – 17 juillet 2015. Québec.
- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G.-A., 2016. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 3 – Petits fruits – 6 mai 2016.
- Lambert, L., Laplante, G.H., Carisse, O., Vincent, C., 2007. Maladies et ravageurs du framboisier, dans: Centre de Références en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (Éd.), Maladies, ravageurs et organismes bénéfiques du fraisier, du framboisier et du bleuetier. Québec, p. 344.
- Lamotte, E., Fleury, F., 2012. Effect of six insecticides on *Neoseiulus fallacis*: a predatory mite in Canadian vineyards. Rev. suisse Vitic. Arboric. Hortic. 44, 244-248.
- Landry, G.-A., 2013. Framboisiers sous abri- parapluie et grand tunnel : où en sommes-nous?, Les journées horticoles de St-Rémi. St-Rémi.
- Landry, G.-A., Ferland, P., Trépanier, R., Gosselin, A., 2013. Mise à l'essai d'une conduite culturale hors-sol pour le framboisier non remontant.
- Lefebvre, M., Bostanian, N.J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. a, Hardman, J.M., 2012. Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). J. Econ. Entomol. 105, 866-871. doi:Doi 10.1603/Ec11260
- Lemaire, É., 2012. La lutte biologique contre les tétranyques dans les framboisières sous tunnels. Université Laval.
- Lemaire, É., Simard, S., 2012. Le *Sorbaria sorbifolia*; plante réservoir de prédateurs naturels du tétranyque à deux points en pépinière. Projet N°6540 (PCAA). Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale.
- Leman, A., Messelink, G.J., 2015. Supplemental food that supports both predator and pest: A risk for biological control? Exp. Appl. Acarol. 65, 511-524. doi:10.1007/s10493-014-9859-y

- Leonardi, C., Guichard, S., Bertin, N., 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 84, 285-296. doi:10.1016/S0304-4238(99)00127-2
- Li, S., Tan, X., Desneux, N., Benelli, G., Zhao, J., Li, X., Zhang, F., Gao, X., Wang, S., 2015. Innate positive chemotaxis to pollen from crops and banker plants in predaceous biological control agents: towards new field lures? *Sci. Rep.* 5, 12729. doi:10.1038/srep12729
- Linder, C., Mittaz, C., Carlen, C., 2003a. Biological control of *Tetranychus urticae* on plastic covered raspberries with native and introduced phytoseiids, in: C. Gordon, S., V. Cross, J. (Éd.), *Integrated Plant Protection in Orchards - Soft Fruits*. IOBC/WPRS, Dundee, Scotland, p. 113-118.
- Linder, C., Mittaz, C., Carlen, C., 2003b. Biological control of *Tetranychus urticae* on plastic covered raspberries with native and introduced phytoseiids. *Integr. Plant Prot. Orchard. - Soft Fruits IOBC/wprs Bull.* 26, 113-118.
- Lundgren, J.G., 2009. Relationships of Natural Enemies and Non-Prey Foods, *Progress in Biological Control*. Springer Science & Business Media, New York. doi:10.1007/978-1-4020-9235-0_4
- McMurtry, J.A., Croft, B. A., 1997. Life-styles of Phytoseiid mites and their roles in biological control. *Annu. Rev. Entomol.* 42, 291-321. doi:10.1146/annurev.ento.42.1.291
- McMurtry, J.A., Huffaker, C.B., Van de Vrie, M., 1970. Ecology of tetranychid mites and their natural enemies: A review. I. Tetranychid enemies: Their biological characters and the impact of spray practices. *Hilgardia* 40, 331-392.
- McMurtry, J.A., Moraes, G.J.D.E., Sourassou, N.F., 2013. Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari : Phytoseiidae). *Syst. Appl. Acarol. Soc.* 18, 297-320.
- McMurtry, J.A., Scriven, G.T., 1964. Studies on the feeding, reproduction, and development of *Amblyseius hibisci* (Acarina: Phytoseiidae) on various food substances. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 57, 649-655. doi:http://dx.doi.org/10.1093/aesa/57.5.649
- Messelink, G.J., Bennison, J., Alomar, O., Ingegno, B.L., Tavella, L., Shipp, L., Palevsky, E., Wäckers, F.L., 2014. Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl* 59, 377-393. doi:10.1007/s10526-014-9579-6
- Monetti, L.N., Croft, B.A., 1997a. Mating, cross-mating and related behaviours of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 21, 67-74.
- Monetti, L.N., Croft, B.A., 1997b. *Neoseiulus californicus* (McGregor) and *Neoseiulus fallacis* (Garman): larval response to prey and humidity, nymphal feeding drive and nymphal predation on phytoseiid eggs. *Exp. Appl. Acarol.* 21, 225-234. doi:10.1023/a:1018442820736
- Monteiro, V.B., Gondim, M.G.C., de M. Oliveira, J.E., Siqueira, H. a. a., Sousa, J.M., 2015. Monitoring *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) resistance to abamectin in vineyards in the Lower Middle São Francisco Valley. *Crop Prot.* 69, 90-96. doi:10.1016/j.cropro.2014.12.012
- Nagelkerke, C.J., Sabelis, M.W., 1998. Precise control of sex allocation phytoseiid mites. *J. Evol. Biol.* 11, 649-684.

- Navajas, M., 1998. Host plant associations in the spider mite *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): insights from molecular phylogeography 22, 201-214.
- Park, H.-H., Shipp, L., Buitenhuis, R., Ahn, J.J., 2011. Life history parameters of a commercially available *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) fed on cattail (*Typha latifolia*) pollen and tomato russet mite (*Aculops lycopersici*). J. Asia. Pac. Entomol. 14, 497-501. doi:10.1016/j.aspen.2011.07.010
- Parolin, P., Bresch, C., Bout, A., Ruiz, G., Poncet, C. and Desneux, N. 2012. Testing banker plants for predator installation. Acta Hort. 927, 211-217. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.927.23
- Parolin, P., Bresch, C., Ruiz, G., Desneux, N., Poncet, C., 2013. Testing banker plants for biological control of mites on roses. Phytoparasitica 41, 249-262.
- Pimentel, D., Andow, D., Dyson-hudson, R., Gallahan, D., Irish, M., Kroop, S., Moss, A., Schreiner, I., Shepard, M., Pimentel, D., Andow, D., Dyson-hudson, R., Gallahan, D., Jacobson, S., Irish, M., Moss, A., Schreiner, I., Shepard, M., Thompson, T., Vinzant, B., 1980. Environmental and social costs of pesticides: a preliminary assessment. Oikos 34, 126-140.
- Pimentel, D., Burgess, M., 2014. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States, dans: Integrated Pest Management. doi:10.1007/978-94-007-7796-5_2
- Pina, T., Argolo, P.S., Urbaneja, A., Jacas, J. a., 2012. Effect of pollen quality on the efficacy of two different life-style predatory mites against *Tetranychus urticae* in citrus. Biol. Control 61, 176-183. doi:10.1016/j.biocontrol.2012.02.003
- Polis, G.A., Myers, C.A., Holt, R.D., 1989. The ecology and evolution of intraguild predation: potential competitors that eat each other. Annu. Rev. Ecol. Syst. 20, 297-330.
- Pomerantz, A.F., Hoy, M. a., 2014. Expression analysis of *Drosophila doublesex*, *transformer-2*, *intersex*, *fruitless-like*, and *vitellogenin* homologs in the parahaploid predator *Metaseiulus occidentalis* (Chelicerata: Acari: Phytoseiidae). Exp. Appl. Acarol. 65, 1-16. doi:10.1007/s10493-014-9855-2
- Pratt, P.D., Croft, B.A., 2000. Banker Plants: Evaluation of release strategies for predatory mites. J. Environ. Hort. 18, 211-217.
- Pratt, P.D., Monetti, L.N., Croft, B.A., 1998. Within-and between-plant dispersal and distributions of *Neoseiulus californicus* and *N. fallacis* (Acari: Phytoseiidae) in simulated bean and apple plant systems. Environ. Entomol. 27, 148-153.
- Pratt, P.D., Schausberger, P., Croft, B.A., 1999. Prey-food types of *Neoseiulus fallacis* (Acari:Phytoseiidae) and literature versus experimentally derived prey-food estimates for five phytoseiid species. Exp. Appl. Acarol. 23, 551-565.
- Rahn, K., 1989. A survey of the genus *Sorbaria* (Rosaceae). Nord. J. Bot. 8, 557-563.
- Reding, M.E., Alston, D.G., Thomson, S. V., Stark, A. V., 2001. Association of powdery mildew and spider mite populations in apple and cherry orchards. Agric. Ecosyst. Environ. 84, 177-186. doi:10.1016/S0167-8809(00)00204-8
- Roda, A., Nyrop, J., Dicke, M., English Loeb, G., 2000. Trichomes and spider-mite ebbing protect predatory mite eggs from intraguild predation. Oecologia 125, 428-435.
- Romero, G.Q., Benson, W.W., 2005. Biotic interactions of mites, plants and leaf domatia. Curr. Opin. Plant Biol. 8, 436-440. doi:10.1016/j.pbi.2005.05.006

- Rota-Stabelli, O., Blaxter, M., Anfora, G., 2013. *Drosophila suzukii*. Curr. Biol. 23, R8-R9. doi:10.1016/j.cub.2012.11.021
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 1999. Seasonal abundance of spider mites and their predators on red raspberry in Quebec, Canada. Environ. Entomol. 735-747.
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 2002. Relationship between temperature and developmental rate of *Stethorus punctillum* (Coleoptera : Coccinellidae) and its prey *Tetranychus mcdanieli* (Acarina : Tetranychidae). Environ. Entomol. 31, 177-187.
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 2005. Seasonal activity of the spider mite predators *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) and *Neoseiulus fallacis* (Acarina: Phytoseiidae) in raspberry, two predators of *Tetranychus mcdanieli* (Acarina: Tetranychidae). Biol. Control 34, 47-57.
- Sabelis, M.W., 1981. Biological control of two-spotted spider mites using phytoseiid predators . Part I Modelling the predator-prey interaction at the individual level. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Sabelis, M.W., Nagelkerke, C.J., 1988. Evolution of Pseudo-Arrhenotoky. Exp. Appl. Acarol. 4, 301-318.
- Sabelis, M.W., Van De Baan, H.E., 1983. Location of distant spider mite colonies by phytoseiid predators: Demonstration of specific kairomones emitted by *Tetranychus urticae* and *Panonychus ulmi*. Entomol. Exp. Appl. 33, 303-314. doi:10.1007/BF02995188
- Sonneveld, T., Wainwright, H., Labuschagne, L., 1996. Development of two spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) populations on strawberry and raspberry cultivars. Ann. Appl. Biol. 129, 405-413. doi:10.1111/j.1744-7348.1996.tb05764.x
- Stacey, D.L., 1977. « Banker » Plant production of *Encarsia formosa* Gahan and its use in the control of glasshouse whitefly on tomatoes. Plant Pathol. 26, 63-66. doi:10.1111/j.1365-3059.1977.tb01025.x
- Suzuki, M., Umeda, H., Matsuo, S., Kawasaki, Y., Ahn, D., Hamamoto, H., Iwasaki, Y., 2015. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. Sci. Hortic. (Amsterdam). 187, 44-49. doi:10.1016/j.scienta.2015.02.035
- Therriault, E., Tellier, S., Fournier, V., Bergeron, D., Rochefort, S., Pouliot, D., Langlois, D., 2013. Adaptation de la méthode des plantes-réservoirs pour le contrôle des tétranyques à deux points sur le framboisier sous grands tunnels, Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur.
- Tixier, M.S., Kreiter, S., Douin, M., 2012. E-Taxonomy of Phytoseiidae mite family [WWW Document]. URL <http://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/phytoseiidae/index.html> (consulté le 2.15.16).
- van de Vrie, M., McMurtry, J.A., Huffaker, C.B., 1972. Ecology of Tetranychid mites and their natural enemies: a review. III. Biology, ecology, and pest status, and host-plant relations of tetranychids. Hilgardia 41, 343-432.
- van Houten, Y.M., Veenendaal, R.L., 1990. Effects of photoperiod, temperature, food and relative humidity on the induction of diapause in the predatory mite *Amblyseius potentillae*. Exp. Appl. Acarol. 10, 111-128.
- Van Leeuwen, T., Vontas, J., Tsagkarakou, A., Dermauw, W., Tirry, L., 2010. Acaricide resistance mechanisms in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and other

- important Acari: A review. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 40, 563-572. doi:10.1016/j.ibmb.2010.05.008
- van Lenteren, J.C., 2011. The state of commercial augmentative biological control: Plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl* 57, 1-20. doi:10.1007/s10526-011-9395-1
- Vangansbeke, D., Nguyen, D.T., Audenaert, J., Verhoeven, R., Gobin, B., Tirry, L., De Clercq, P., 2014. Food supplementation affects interactions between a phytoseiid predator and its omnivorous prey. *Biol. Control* 76, 95-100. doi:10.1016/j.biocontrol.2014.06.001
- Vangansbeke, D., Nguyen, D.T., Audenaert, J., Verhoeven, R., Gobin, B., Tirry, L., De Clercq, P., 2015. Supplemental food for *Amblyseius swirskii* in the control of thrips: Feeding friend or foe? *Pest Manag. Sci.* 72, 466-473. doi:10.1002/ps.4000
- Vantornhout, I., Minnaert, H., Tirry, L., De Clercq, P., 2004. Effect of pollen, natural prey and factitious prey on the development of *Iphiseius degenerans*. *BioControl* 49, 627-644. doi:10.1007/s10526-004-5280-5
- Villeneuve, C., 2011. Portrait des grands tunnels au Québec et à l'étranger. [WWW Document]. 2011. URL http://www.craaq.qc.ca/UserFiles/file/Evenements/EPTF1101/Villeneuve_PPT.pdf (consulté le 3.24.15)
- Walzer, A., Castagnoli, M., Simoni, S., Liguori, M., Palevsky, E., Schausberger, P., 2007. Intraspecific variation in humidity susceptibility of the predatory mite *Neoseiulus californicus*: Survival, development and reproduction. *Biol. Control* 41, 42-52. doi:10.1016/j.biocontrol.2006.11.012
- Whalon, M.E., Mota-Sanchez, R.M., Hollingworth, R.M., 2016. Arthropod Pesticide resistance Database (APRD) [WWW Document]. 2016. URL <http://www.pesticideresistance.org> (consulté le 2.23.16).
- Wien, H.C., 2009. Microenvironmental variations within the high tunnel. *HortScience* 44, 235-238.
- Wood, L.A., 1992. Biological control of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch, in raspberries using the predatory mite, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot. Simon Fraser University.
- Xu, Q., Gosselin, A., Desjardins, Y., 2014. Red Raspberries Production under High Tunnel , Umbrella-like Structure and Open Field under Northern Canadian Climate. *Acta Hortic.* 1037, 771-776. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1037.101
- Yorulmaz Salman, S., Sarıtaş, E., 2014. Acequinocyl resistance in *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae): inheritance, synergists, cross-resistance and biochemical resistance mechanisms. *Int. J. Acarol.* 40, 428-435. doi:10.1080/01647954.2014.944932
- Zhang, Z.-Q., 2003. *Mites of Greenhouses Identification, Biology and Control*. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK. doi:10.1079/9780851995908.0000

Appendices

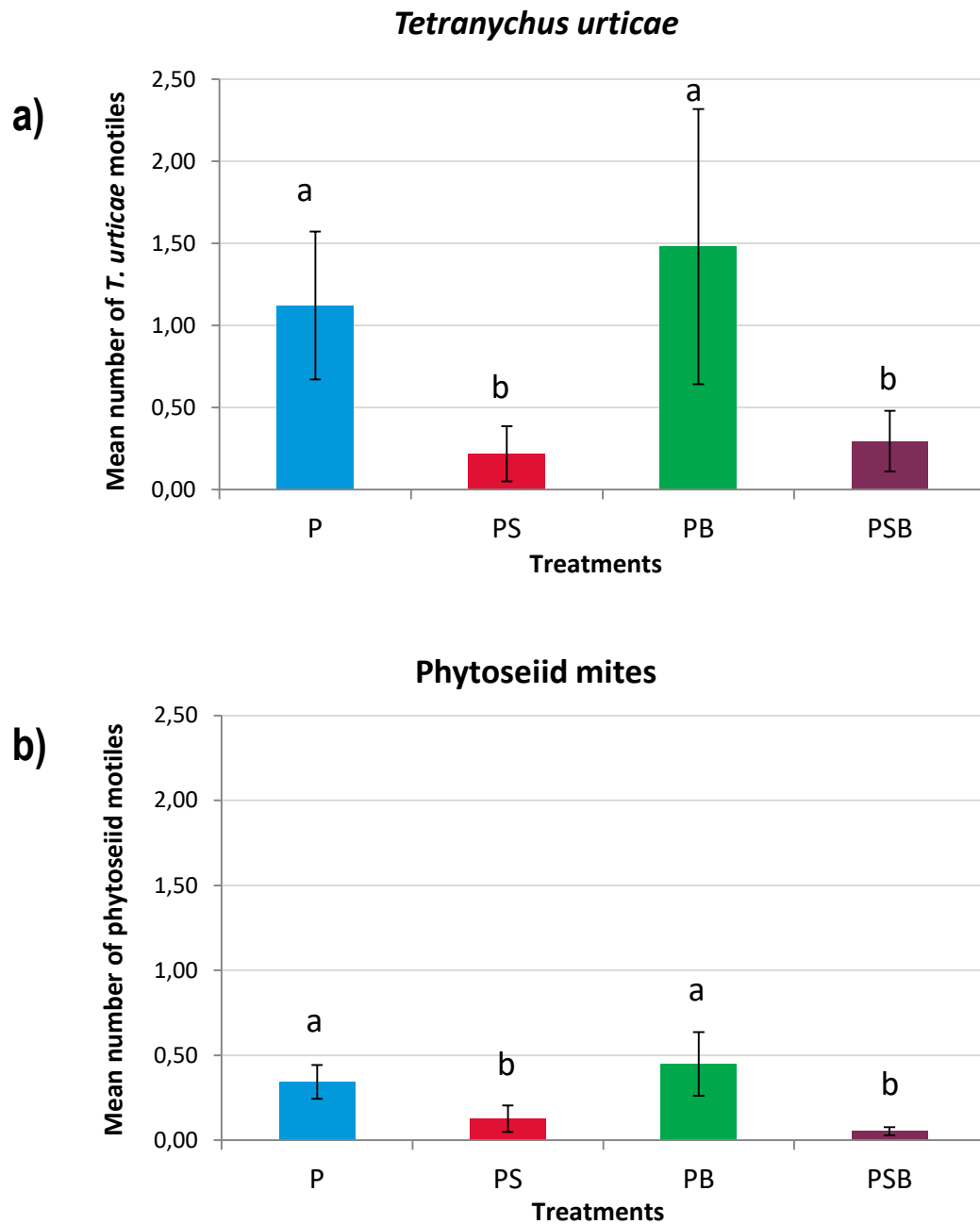


Figure 5. Average number of motiles (\pm CI) of (a) *Tetranychus urticae* and (b) phytoseiid mites per leaflet among treatments in 2014 at Pouliot farm; where P = predators only (control), PS = Predators + food supplement, PB = predators + banker plants and PSB = predators + food supplement + banker plants *Bars with different letters are considered statistically different at the 0.05 level by the protected LSD test.

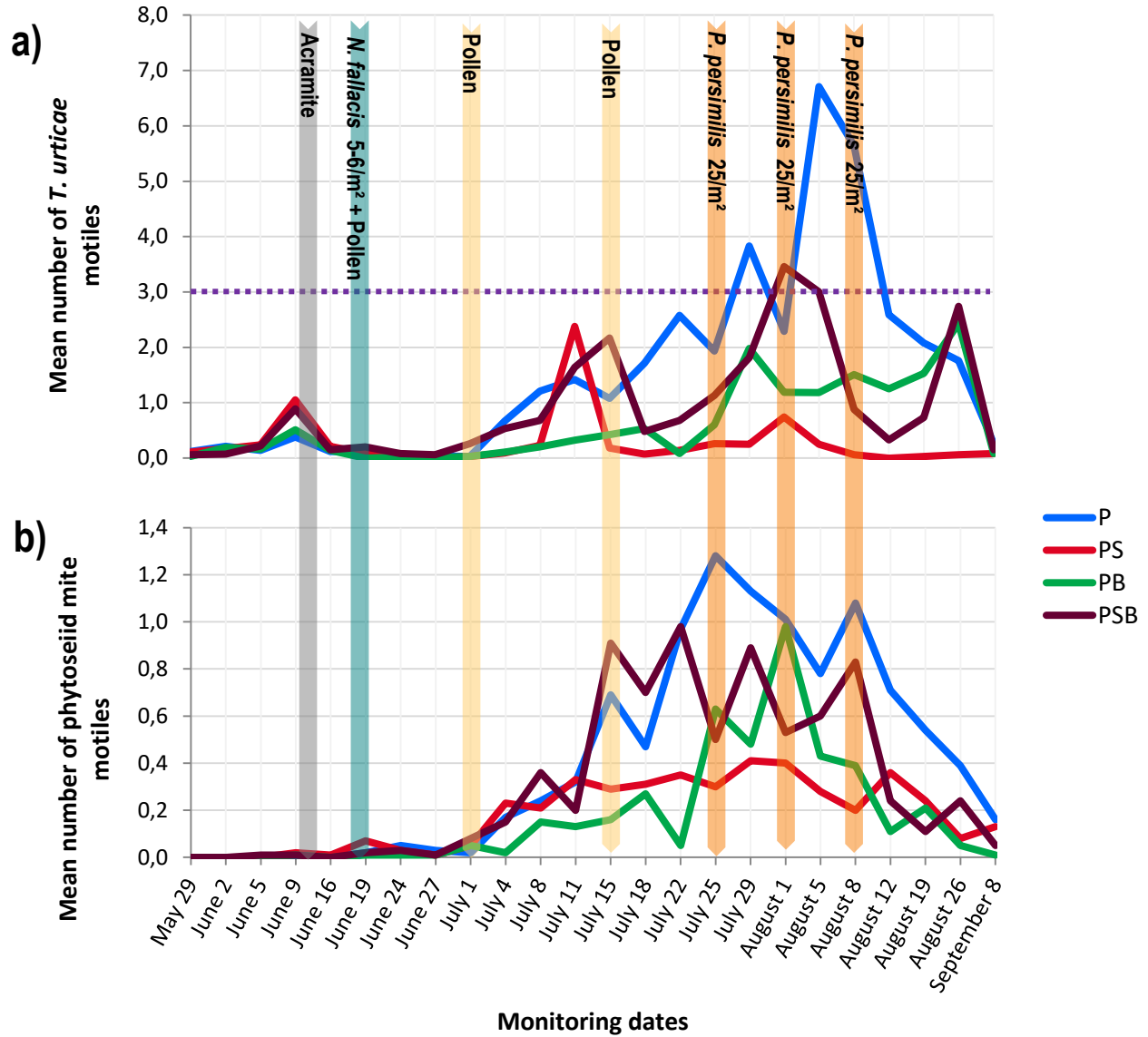


Figure 6. Population evolution of (a) *T. urticae* and (b) phytoseiid mites per leaflet among treatments in 2014 at Pouliot farm; where P = predators only (control), PS = Predators + food supplement, PB = predators + banker plants and PSB = predators + food supplement + banker plants. Arrows represent phytoseiid releases, food supplement (pollen) and miticide applications. TSSM intervention threshold (3 motiles / leaflet) appears as a purple dashed line in a). *P. persimilis* introduction has been made in PSB plots on July 25th and in P and PB plots on August 1st and 8th.

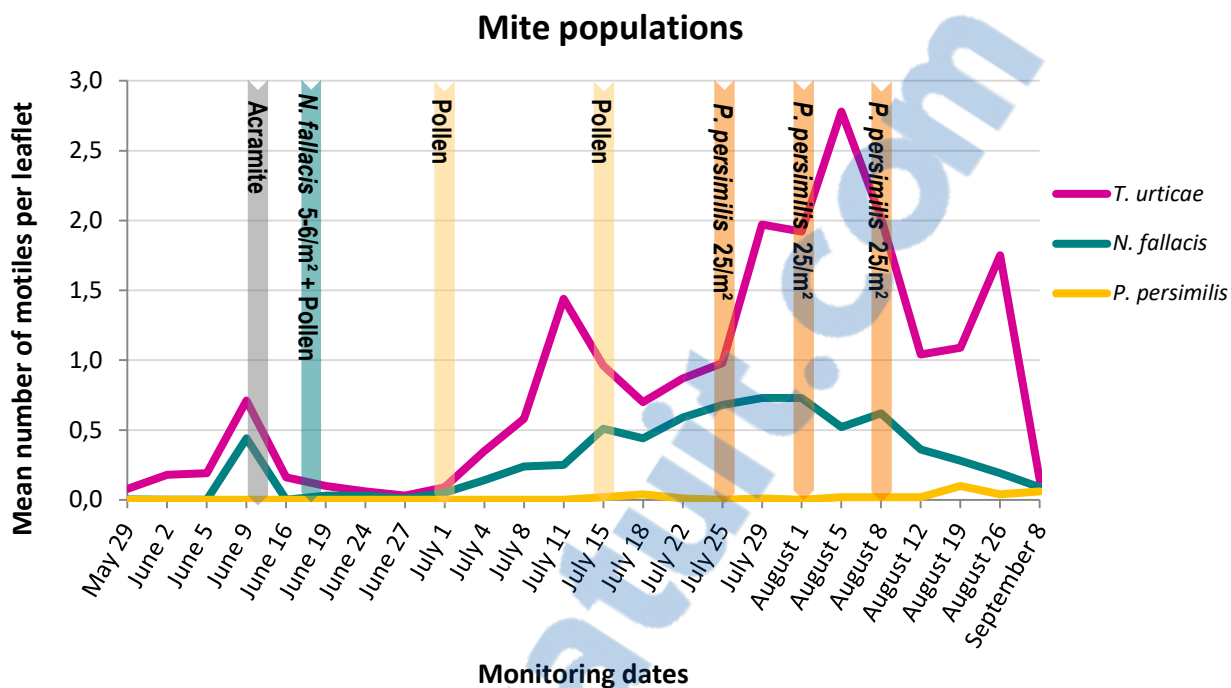


Figure 7. Average populations of *Tetranychus urticae*, *Neoseiulus fallacis* and *Phytoseiulus persimilis* of all treatments in 2014 at the Pouliot farm. Arrows represent phytoseiid releases, food supplement (pollen) and miticide applications. *P. persimilis* introduction has been made in PSB plots on July 25th and in P and PB plots on August 1st and 8th.

Table 2. Estimated costs for treatments in 2014 at the Pouliot farm

Treatments	Inputs (\$/ha)	Labor (\$/ha)	Total (\$/ha)
1 (predators only)	1 Acramite = 238 1 int. <i>N. fallacis</i> = 1 440 2 int. <i>P. persimilis</i> = 2 x 775	35 96 2 x 96	3 551
2 (predators + food supplement)	1 Acramite = 238 1 int. <i>N. fallacis</i> = 1 440 Pollen = 3 x 280 + 60\$	35 96 3 x 20	2 709 + 60\$/year
3 (predators + banker-plants)	1 Acramite = 238 1 int. <i>N. fallacis</i> = 1 440 2 int. <i>P. persimilis</i> = 2 x 775 <i>Sorbaria sorbifolia</i> = 646	35 96 2 x 96 36	4 233
4 (predators + food supplement + banker-plants)	1 Acramite = 238 1 int. <i>N. fallacis</i> = 1 440 1 int. <i>P. persimilis</i> = 775 Pollen = 3 x 280 + 60\$ <i>Sorbaria sorbifolia</i> = 646	35 96 96 3 x 20 36	4 262 + 60\$/year
Conventional control	1 Acramite = 238 2 other miticides = 500	35 2 x 35	843

Table 3. ANOVA table from analysis of the TSSM population in 2015 for both farms combined

Source	DF ^{numerator}	DF ^{denominator}	F-value	P-value
Misting	1	27.18	2.94	0.0979
Food supplement	1	27.83	0.74	0.3958
Interaction Misting*Food supplement	1	27.92	0.02	0.8800
Date	14	371	36.86	<.0001
Interaction Misting*Date	14	371	6.86	<.0001 ^{***}
Interaction Food supplement*Date	14	371	1.34	0.1799
Interaction Misting*Food supplement*Date	14	371	1.63	0.0697

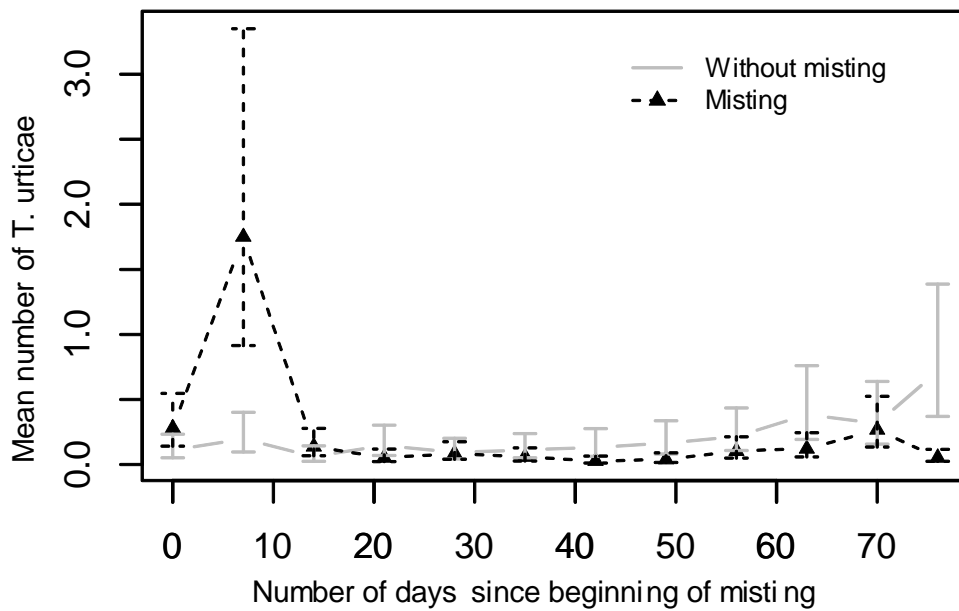


Figure 8. Average number of *Tetranychus urticae* motiles (\pm SE) per leaflet with and without misting in 2015 for both growers combined

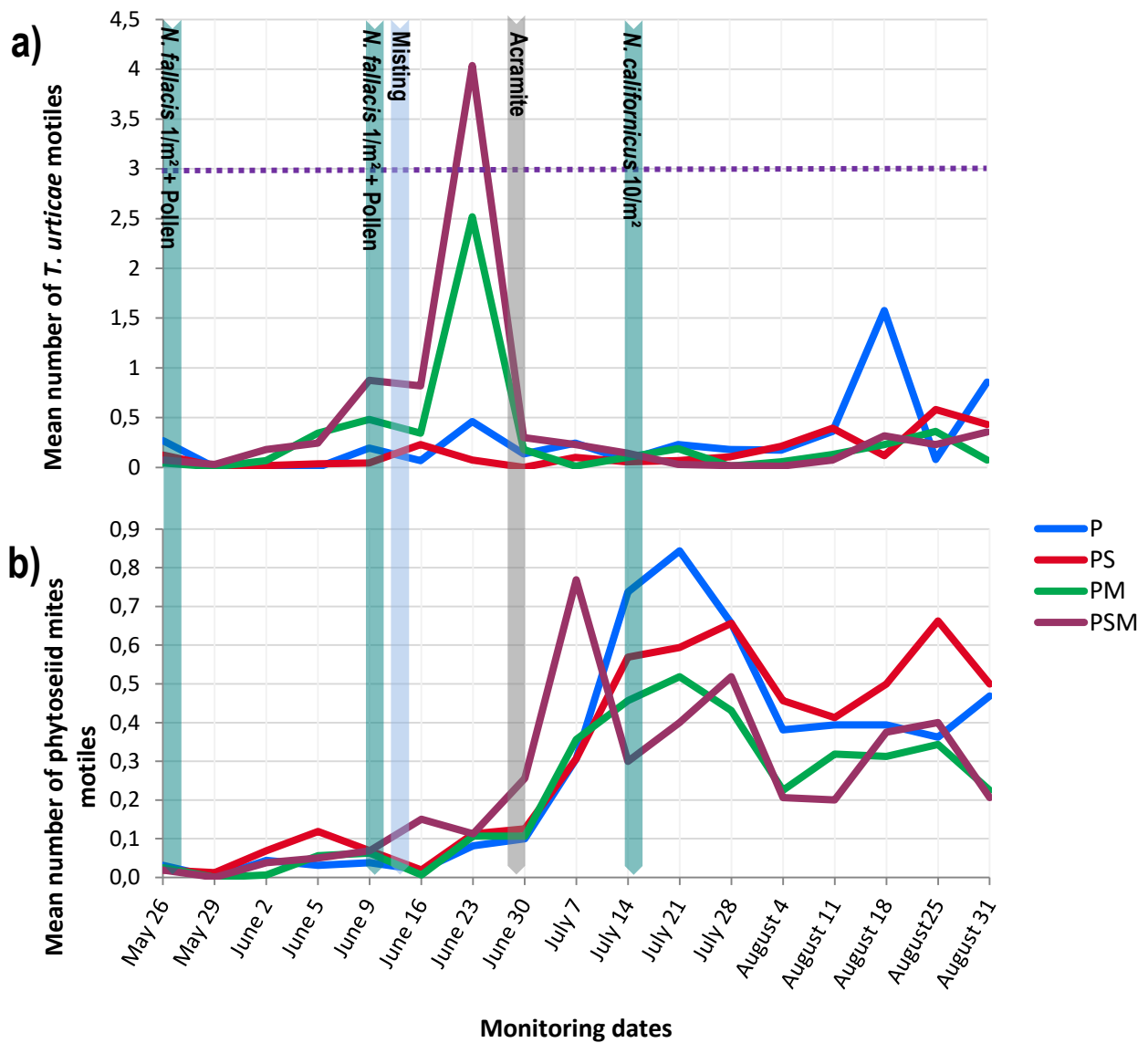


Figure 9. Population evolution of (a) *Tetranychus urticae* and (b) phytoseiid mites per leaflet among treatments in 2015 for both farms combined; where P = predators only (control), PS = Predators + food supplement, PM = predators + misting and PSM = predators + food supplement + misting. Arrows represent phytoseiid releases, food supplement (pollen) and miticide applications. TSSM intervention threshold (3 motiles / leaflet) appears as a purple dashed line in a). *N. californicus* was introduced in all plots on July 14.

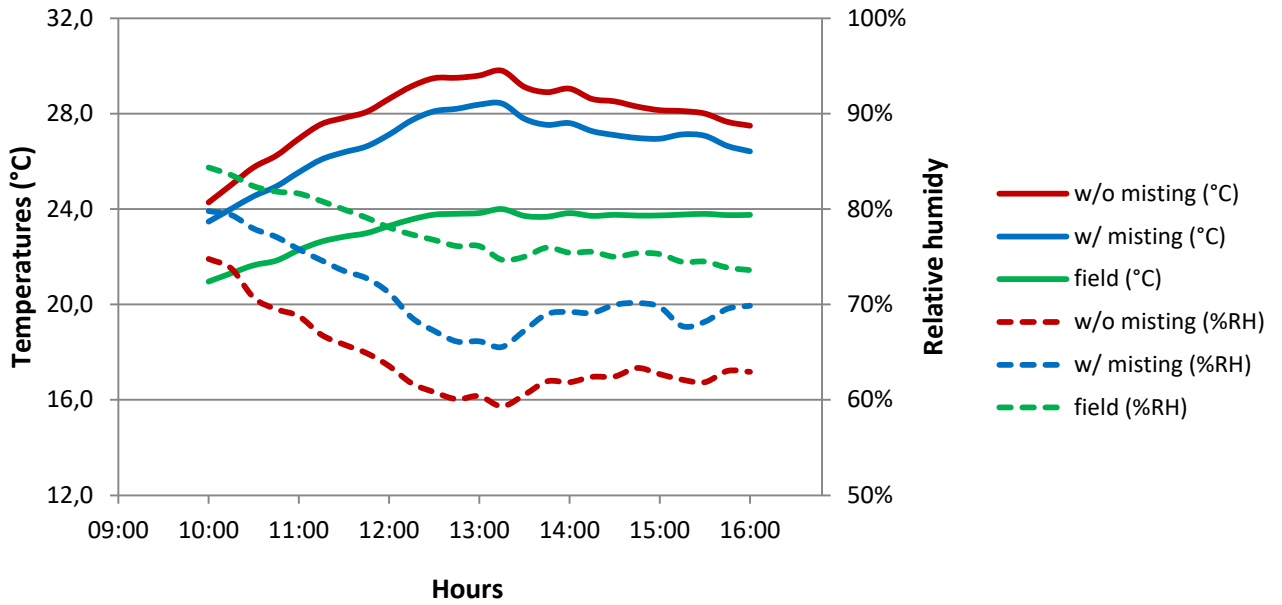


Figure 10. Average temperatures (°C) and relative humidity (%) without misting (w/o misting), with misting (w/ misting) and outside the tunnels (field) between 10 a.m. and 4 p.m. (hours where misting system was on) in August 2015 at Pouliot farm

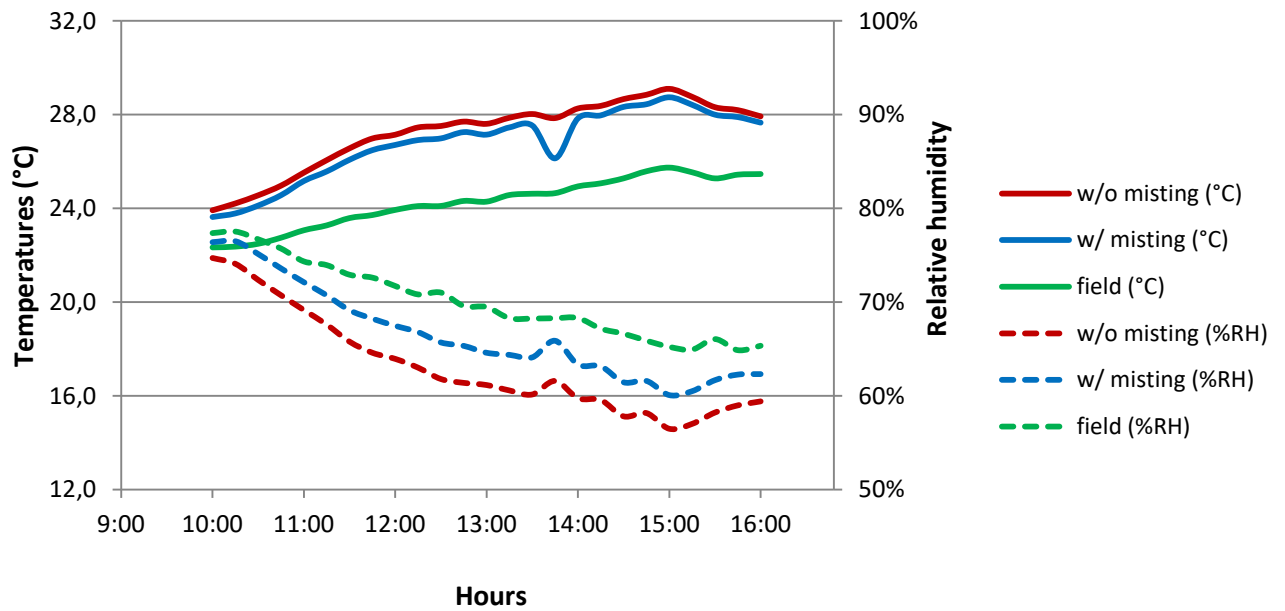


Figure 11. Average temperatures (°C) and relative humidity (%) without misting (w/o misting), with misting (w/ misting) and outside the tunnels (field) between 10 a.m. and 4 p.m. (hours where misting system was on) in August 2015 at Demers farm

Table 4. Estimated costs of treatments in 2015 for both farms combined

Treatments	Input (\$/ha)	Labor (\$/ha)	Total (\$/ha)
1 (predators only)	<i>N. fallacis</i> = 2 x 240 Miticides = 488 <i>N. californicus</i> = 441	2 x 96 2 x 35 96	1 767
2 (predators + food supplement)	<i>N. fallacis</i> = 2 x 240 Nutrimite = 2 x 280 + 60\$ Miticides = 488 <i>N. californicus</i> = 441	2 x 96 2 x 20 2 x 35 96	2 367+ 60\$/year
3 (predators + misting)	<i>N. fallacis</i> = 2 x 240 Misting = 1953 Miticides = 488 <i>N. californicus</i> = 441	2 x 96 225 2 x 35 96	3 945
4 (predators + food supplement + misting)	<i>N. fallacis</i> = 2 x 240 Nutrimite = 2 x 280 + 60\$ Misting = 1953 Miticides = 488 <i>N. californicus</i> = 441	2 x 96 2 x 20 225 2 x 35 96	4 545+ 60\$/year
Conventional control	Miticides = 488	2 x 35	558

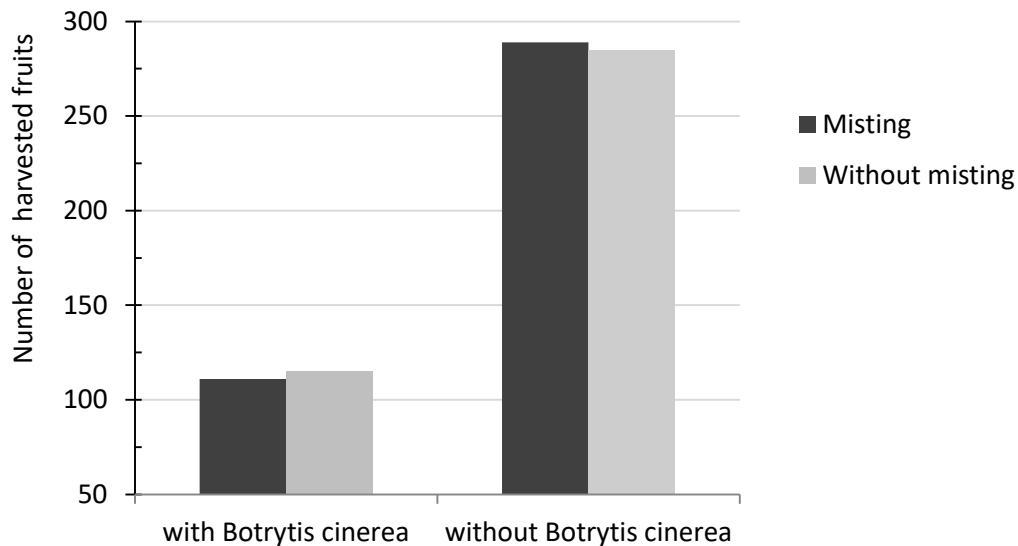


Figure 12. Total of raspberries harvested between September 10th and 21st, with and without *Botrytis cinerea* at Demers farm in 2015; n = 400 in each tunnel.

Chapitre III : Conclusion générale

Le principal objectif de cette étude était d'améliorer l'efficacité de la lutte intégrée contre les tétranyques tout en diminuant le nombre d'introductions requises de prédateurs phytoséiides dans la culture du framboisier sous grands tunnels. Durant ce projet nous avons donc, dans un premier temps, testé l'efficacité de plusieurs techniques de lutte intégrée soit : a) le prédateur *Neoseiulus fallacis* combiné à la plante-réservoir *S. sorbifolia*; b) le prédateur *N. fallacis* combiné à un supplément nutritif pour phytoséiides; c) le prédateur *N. fallacis* combiné à la brumisation; et d) plusieurs combinaisons de ces techniques, et les avons comparées à l'utilisation de prédateurs seuls (témoin). Nous avons ensuite estimé et comparé les coûts associés à ces différentes techniques non seulement entre elles, mais aussi avec la lutte conventionnelle (acaricides).

La première hypothèse de recherche stipulant que les techniques à l'essai permettent un meilleur contrôle du tétranyque que l'utilisation seule du phytoséiide *Neoseiulus fallacis* a été partiellement validée. En effet, il n'est pas possible d'affirmer que les diverses combinaisons de méthodes de lutte de cette étude ont toujours permis un meilleur contrôle des tétranyques; certains résultats ne sont pas significativement différents du traitement témoin (prédateurs seuls). Par exemple, en 2014, les traitements « prédateurs et supplément nutritif » ainsi que « prédateurs, supplément nutritif et plante-réservoir », bien qu'équivalents entre eux, étaient statistiquement différents du traitement témoin : la population moyenne de tétranyques étant plus élevée dans ce dernier. Par contre, le traitement « prédateurs et plante-réservoir » ne différait pas statistiquement du traitement témoin. Ce ne sont donc pas tous les traitements qui ont permis un meilleur contrôle que le témoin. Lors des résultats de l'année 2015, les trois traitements (« prédateurs et supplément nutritif »; « prédateurs et brumisation » et « prédateurs, supplément nutritif et brumisation ») ont été significativement différents du traitement témoin lors du dépistage du 18 août seulement.

La deuxième hypothèse de recherche énonçant que l'application des techniques essayées permet de diminuer le nombre d'introductions requises de prédateurs pour assurer un contrôle efficace est aussi partiellement confirmée. Le traitement « prédateur et supplément nutritif » des essais 2014 a été celui qui a requis le moins d'introduction durant cette année de tests. Comparativement aux autres, ce traitement a donc permis de réduire le nombre d'introductions de prédateurs tout en contrôlant les populations de *T. urticae*. En 2015, toutes les parcelles ont reçu le même nombre d'introductions de phytoséiides. Il s'agit d'une méthode plus juste pour évaluer l'efficacité des traitements sur les

phytoséiides; les biais reliés aux taux d'individus phytoséiides étant supprimés. Néanmoins, un taux plus faible de phytoséiides a été introduit dans les parcelles en 2015 qu'en 2014. Les populations naturelles de tétranyques variant d'une année à l'autre, selon les conditions climatiques et la rigueur de l'hiver précédent, ont certainement pu avoir une influence sur le nombre de lâchers de prédateurs requis pour le contrôle du tétranyque.

Enfin, la troisième hypothèse de cette étude affirmant que les deux combinaisons de techniques les plus efficaces pour le contrôle du tétranyque est « prédateurs, supplément nutritif et plante-réservoir » ainsi que « prédateurs, supplément nutritif et brumisation » n'est pas complètement fondée. Contrairement à ce à quoi nous nous attendions, il n'y a pas eu d'effet additif significatif lors de la combinaison du supplément nutritif et des autres techniques (plante-réservoir ou brumisation) : en 2014, le traitement « prédateur et supplément nutritif » n'était pas significativement différent du traitement « prédateurs, supplément nutritif et plante-réservoir », ni en ce qui a trait aux populations de tétranyques ni aux populations de prédateurs. La combinaison « supplément nutritif et plantes-réservoirs n'a donc pas montré d'avantages. En 2015, l'interaction « brumisation et supplément nutritif » n'a pas non plus été significative.

Cette étude a démontré que la lutte intégrée aux tétranyques sous tunnels est réalisable et souhaitable. Bien qu'aucune hypothèse n'ait été indubitablement confirmée, les résultats obtenus sont encourageants et permettront d'orienter de futurs travaux de recherche.

Dans tous les cas, les traitements à l'essai ont été plus onéreux que la lutte conventionnelle (avec acaricides seulement). Néanmoins, la problématique de résistance aux pesticides et de la présence de ceux-ci sur les denrées alimentaires, ainsi que dans l'environnement, restent préoccupantes et représentent des coûts indirects liés à l'application de pesticides de synthèse. Les coûts estimés des techniques à l'essai durant cette étude varient grandement entre les traitements et d'une année à l'autre.

En 2014, le traitement « prédateurs et supplément nutritif » a présenté le plus faible coût à l'hectare, alors qu'il a été le plus efficace pour contrôler les tétranyques. L'application de ce traitement, bien qu'il ait été non significativement différent du traitement « prédateurs, supplément nutritif et plante-réservoir », a toutefois été 36% moins dispendieux que celui-ci. Toujours en 2014, les plantes-réservoirs elles-mêmes étaient la composante avec le plus faible coût de base. En effet, l'ajout des sorbarias a été moins

dispendieux que l'application de pollen et le système de brumisation. Malgré cela, davantage d'introductions de phytoséides ont été faites dans les traitements avec plante-réservoir que dans le traitement « prédateurs et supplément nutritif », augmentant ainsi les coûts liés à l'utilisation des plantes-réservoirs. Un avantage principal de l'utilisation étant la réduction des coûts d'introduction, nous pouvons affirmer que cet aspect n'a pas été atteint durant l'étude.

En 2015, les coûts associés au traitement témoin (prédateurs seulement) ont été 50% plus faibles qu'en 2014 pour le même traitement. De plus, le contrôle des tétranyques dans ce traitement a été supérieur en 2015; la moyenne de ravageurs étant moindre lors de cette année qu'en 2014. En fait, mis à part les traitements « prédateurs, supplément nutritif et plante-réservoir » (2014) et « prédateurs, supplément nutritif et brumisation » (2015), les coûts des traitements étaient moins importants en 2015 qu'en 2014. Ce traitement a en effet coûté 6% de plus en 2015. Pour les autres traitements, ils ont respectivement coûté 50%, 13% et 7% de moins en 2015 qu'en 2014.

L'utilisation de supplément nutritif pour phytoséides semble être de plus en plus courante. À notre connaissance, aucune recherche en champ portant spécifiquement sur un supplément à base de pollen et *Neoseiulus fallacis* n'avait été réalisée avant la nôtre. Le supplément à base de pollen de quenouille qui est commercialisé par BioBest sous le nom « Nutrimite » s'est démontré compatible avec le phytoséide *N. fallacis*. D'ailleurs, les parcelles des traitements avec ce supplément nutritif ont toujours permis de maintenir la population de tétranyques sous le seuil d'intervention de trois formes mobiles par folioles.

Bien qu'elle semblait prometteuse, l'utilisation du *Sorbaria sorbifolia* comme plante-réservoir n'a pas eu l'effet escompté. En effet, les résultats démontrant que cet arbuste attirait naturellement les populations de phytoséides indigènes étaient encourageants pour le développement d'une méthode peu coûteuse de lutte intégrée. L'effet « réservoir » des sorbarias s'étant avéré trop aléatoire pour être considéré comme une solution pertinente aux producteurs, cette méthode a donc été mise de côté. Toutefois, les plantes-réservoirs fonctionnent dans diverses cultures. De plus amples recherches pourraient être faites afin de découvrir la combinaison « plante-réservoir + phytoséides + framboisiers sous tunnels » adéquate.

La brumisation est un procédé qui est actuellement très peu documenté pour les grands tunnels. Les résultats obtenus par cette étude encourageront peut-être la

recherche sur cette avenue. La brumisation des tunnels a eu un effet sur la population de tétranyques; les parcelles avec le traitement brumisation ont permis de maintenir les populations de tétranyques sous le seuil d'intervention. Cependant, il est difficile de déterminer si les conditions créées par la brumisation ont favorisé les prédateurs et leur efficacité à contrôler les ravageurs ou si elles ont plutôt désavantagé les tétranyques. Bien que la brumisation n'ait pas démontré d'effet positif sur les prédateurs, des changements non-négligeables au niveau des températures et de l'humidité relative ont été observés. Ces résultats sont encourageants et nous croyons fermement qu'optimiser le matériel de brumisation et la programmation pourrait avoir un impact supérieur sur les interactions prédateurs-proies que celui que nous avons obtenu. Toutefois, la brumisation sous grands tunnels représente un coût important. C'est aussi à ce niveau que la mise au point d'une technique (matériel, programmation, qualité de l'eau, etc.) spécifique aux grands tunnels est nécessaire; plus la méthode sera adéquate, plus les résultats seront probants et plus les coûts associés seront intéressants. Afin d'améliorer cette méthode, de futures recherches, sur plusieurs années consécutives, sont à souhaiter. Les résultats obtenus sur un an d'essais de cette étude sont encourageants, il faudrait par contre répéter l'expérience, lors d'été chauds et secs, afin d'obtenir des résultats davantage concluants.

Finalement, nous croyons qu'il est important de faire plusieurs introductions du prédateur indigène *N. fallacis* au fil des années afin de bâtir un « historique » de prédateurs sur la ferme. Ce faisant, les prédateurs se retrouvent naturellement dans la culture beaucoup plus tôt au printemps et permettent donc de mieux contrôler la population de tétranyques. En effet, nous avons remarqué une différence au niveau de la présence hâtive des phytoséiides chez les deux entreprises participant au projet : une avait un historique d'introductions de phytoséiides et l'autre non. Plusieurs années d'introductions consécutives pourraient donc permettre un meilleur contrôle des ravageurs. Toutefois, il est primordial de choisir des prédateurs indigènes ou qui survivent à nos conditions hivernales.

La culture de framboisiers sous grands tunnels prend de l'ampleur au Québec, aussi, les consommateurs sont davantage intéressés à acheter localement et sont plus conscients sur l'usage des pesticides. D'ailleurs, dans la présente démarche gouvernementale de réduction des pesticides, des alternatives efficaces aux pesticides de synthèse doivent être mises en place. Il y a donc lieu de trouver des solutions contre le tétranyque en framboisières sous grands tunnels, un ravageur principal de cette culture.

La lutte biologique est adéquate pour la culture sous grands tunnels, l'amélioration de l'efficacité de celle-ci ne pourra que démocratiser et encourager cette avenue pour les producteurs. L'amélioration de l'efficacité de la lutte biologique dans un contexte de lutte intégrée est certainement une perspective d'avenir pour le développement d'une agriculture plus durable.

Bibliographie

- Adar, E., Inbar, M., Gal, S., Gan-Mor, S., Palevsky, E., 2014. Pollen on-twine for food provisioning and oviposition of predatory mites in protected crops. *BioControl* 59, 307-317.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007. Profil de la culture de la framboise au Canada.
- Agrios, G.N., 2004. Plant pathology, 5 th editi. ed. Elsevier Academic Press.
- Ahlstrom, K.R., Rock, G.C., 1973. Comparative Studies on *Neoseiulus fallacis* and *Metaseiulus occidentalis* for Azinphosmethyl Toxicity and Effects of Prey and Pollen on Growth. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 66, 1109-1113. doi:<http://dx.doi.org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1093/aesa/66.5.1109>
- Allen, G., Halsall, C.J., Ukpebor, J., Paul, N.D., Ridall, G., Wargent, J.J., 2015. Increased occurrence of pesticide residues on crops grown in protected environments compared to crops grown in open field conditions. *Chemosphere* 119, 1428-1435.
- Applied Bio-nomics Ltd, 2015a. *Amblyseius (Neoseiulus) fallacis*; Spider Mite Predator Technical Manual, Sheet 201 - Fallacis.
- Applied Bio-nomics Ltd, 2015b. *Persimilis (Phytoseiulus persimilis)*; Two-spotted Mite Predator Technical Manual, Sheet 200 - Persimilis.
- Argov, Y., Berkeley, M., Domeratzky, S., Melamed, E., Weintraub, P., Palevsky, E., 2006. Identification of pollens for small scale mass rearing of *Neoseiulus californicus* and a novel method for quality control. *IOBC/wprs Bull.* 29, 127-132.
- Audenaert, J., Vangansbeke, D., Verhoeven, R., De Clercq, P., Tirry, L., Gobin, B., 2014. The influence of variable temperature and humidity on the predation efficiency of *P. persimilis*, *N. californicus* and *N. fallacis*. *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci.* 79, 117-122.
- Auger, P., Tixier, M.S., Kreiter, S., Fauvel, G., 1999. Factors affecting ambulatory dispersal in the predaceous mite *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 23, 235-250. doi:10.1023/A:1006019014708
- Authier, N., 2011. Évaluation du *Sorbaria sorbifolia* comme plante réservoir de prédateurs naturels dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points (No. Numéro de projet: 1508), Rapport d'étape.
- Authier, N., Lemaire, É., Rochefort, S., 2012. Évaluation du *Sorbaria sorbifolia* comme plante réservoir de prédateurs naturels dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points (No. Numéro du projet: 1508), Rapport Final.
- Baeza, E.J., Stanghellini, C., Castilla, N., 2013. Protected cultivation in Europe. *Acta Hortic.* 987, 11-28.
- Beaulieu, F., Neven, L., Vega, H.E., 2014. Morphological Identification of Spider Mites (Tetranychidae) Affecting Imported Fruits. Ottawa, Canada.
- Berry, J.S., Holtzer, T.O., 1990. Ambulatory Dispersal Behavior of *Neoseiulus fallacis* (Acarina: Phytoseiidae) in Relation To Prey Density and Temperature. *Exp. Appl. Acarol.* 8, 253-274. doi:10.1007/BF01202136
- Biobest Canada Ltd, 2015a. *Phytoseiulus persimilis* Acarien prédateur des tétranyques. Leamington, Canada.
- Biobest Canada Ltd, 2015b. Auxiliaires pour lutter contre les tétranyques.
- Biobest Ltd, 2013. Fiche de produit NUTRIMITE. Westerlo, Belgique.
- Biobest Ltd, 2015a. *Amblyseius californicus* Acarien prédateur des tétranyques et autres acariens. Leamington, Canada.
- Biobest Ltd, 2015b. Contrôle biologique: Auxiliaires [WWW Document]. URL <http://www.biobestgroup.com/fr/biobest/produits/controle-biologique-4459/> (consulté le 11.22.15).

- Borsa, P., Kjellberg, F., 1996. Secondary sex ratio adjustment in a pseudo-arrhenotokous insect, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). *Life Sci.* 319, 1159-1166.
- Bostanian, N.J., Hardman, J.M., Thistlewood, H. a, Racette, G., 2010. Effects of six selected orchard insecticides on *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) in the laboratory. *Pest Manag. Sci.* 66, 1263-7. doi:10.1002/ps.2010
- Both, a J., 2008. Greenhouse Temperature Management. *Greenh. Energy Cost Reduct. Strateg.* 1-4.
- Brown, D., Hanson, E., 2014. Framboisiers cultivés en pot dans un abri-serre [WWW Document]. Ministère l'Agriculture, l'Alimentaion des Aff. Rural. URL <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/allontario/ao0314a2.htm> (consulté le 3.6.16).
- Brunner, E., Domhof, S., Langer, F., 2002. Nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Bushway, L., Pritts, M., Handley, D., 2008. Raspberry and Blackberry Production Guide for the Northeast, Midwest, and Eastern Canada. NRAES, Ithaca, NY.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., 2005. Biology, 7th editio. ed. Pearson Education.
- Caron, J., Laverdière, L., Roy, M., 2000. Guide de lutte intégrée contre les tétranyques dans la production de la framboise. Horti-Protection inc.
- Castaglioni, M., Simoni, S., 1994. The effect of different constant humidities on eggs and larvae of *Amblyseius californicus* (McGregor) (Acarina: Phytoseiidae). *Redia* 3, 349-359.
- Castilho, R.C., Duarte, V.S., de Moraes, G.J., Westrum, K., Trandem, N., Rocha, L.C.D., Delalibera, I., Klingen, I., 2015. Two-spotted spider mite and its natural enemies on strawberry grown as protected and unprotected crops in Norway and Brazil. *Exp. Appl. Acarol.* 66, 509-528. doi:10.1007/s10493-015-9913-4
- Chant, D. a., 1959. Phytoseiid Mites (Acarina: Phytoseiidae). *Mem. Entomol. Soc. Canada* 91, 5-166. doi:10.4039/entm9112fv
- Connellan, G.J., 2002. Selection of greenhouse design and technology options for high temperature regions. *Acta Hort.* 578, 113-117.
- CPVQ, 1997. Petits fruits : culture. Québec.
- Croft, B. a., Croft, M.B., 1993. Larval survival and feeding by immature *Metaseiulus occidentalis*, *Neoseiulus fallacis*, *Amblyseius andersoni* and *Typhlodromus pyri* on life stage groups of *Tetranychus urticae* Koch and phytoseiid larvae. *Exp. Appl. Acarol.* 17, 685-693. doi:10.1007/BF00058508
- Croft, B. a., Messing, R.H., Dunley, J.E., Strong, W.B., 1993. Effects of humidity on eggs and immatures of *Neoseiulus fallacis*, *Amblyseius andersoni*, *Metaseiulus occidentalis* and *Typhlodromus pyri* (Phytoseiidae): implications for biological control on apple, caneberry, strawberry and hop. *Exp. Appl. Acarol.* 17, 451-459. doi:10.1007/BF00120503
- Croft, B.A., Jung, C., 2001. Phytoseiid dispersal at plant to regional levels: A review with emphasis on management of *Neoseiulus fallacis* in diverse agroecosystems. *Exp. Appl. Acarol.* 25, 763-784.
- Croft, B.A., Monetti, L.N., Pratt, P.D., 1998. Comparative Life Histories and Predation Types : Are *Neoseiulus californicus* and *N. fallacis* (Acari : Phytoseiidae) Similar Type II Selective Predators of Spider Mites ? *Environ. Entomol.* 27, 531-538.
- De Courcy Williams, M., Kravar-garde, L., Fenlon, J., Sunderland, K., 2004. Phytoseiid mites in protected crops: the effect of humidity and food availability on egg hatch and adult life span of *Iphiseius degenerans*, *Neoseiulus cucumeris*, *N. californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 32, 1-13.
- Delisle, J.F., 2014. Évaluation de suppléments alimentaires pour deux espèces d'acariens prédateurs ,

Amblyseius swirskii et *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) pour l'optimisation du contrôle biologique du thrips des petits fruits (*Frankliniella occidentalis*). Université de Montréal.

- Delisle, J.F., Brodeur, J., Shipp, L., 2015. Evaluation of various types of supplemental food for two species of predatory mites, *Amblyseius swirskii* and *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 483-94.
- Demchak, K., Hanson, E.J., 2013. Small fruit production in high tunnels in the US. *Acta Hortic.* 987, 41-44.
- Demite, P.R., McMurtry, J.A., De Moraes, G.J., 2014. Phytoseiidae Database: a website for taxonomic and distributional information on phytoseiid mites (Acari). *Zootaxa* 3795, 571-577.
- Duarte, M.V.A., Venzon, M., Bittencourt, M.C. de S., Rodríguez-Cruz, F.A., Pallini, A., Janssen, A., 2015. Alternative food promotes broad mite control on chilli pepper plants. *BioControl* 60, 817-825. doi:10.1007/s10526-015-9688-x
- Edin, M., Gaillard, P., Massardier, P., 1999. *Le Framboisier*, Centre tec. ed. Paris.
- Ferreira, C.B.S., Andrade, F.H.N., Rodrigues, A.R.S., Siqueira, H. a. a., Gondim, M.G.C., 2015. Resistance in field populations of *Tetranychus urticae* to acaricides and characterization of the inheritance of abamectin resistance. *Crop Prot.* 67, 77-83. doi:10.1016/j.cropro.2014.09.022
- Ferrero, M., Gigot, C., Tixier, M.S., van Houten, Y.M., Kreiter, S., 2010. Egg hatching response to a range of air humidities for six species of predatory mites. *Entomol. Exp. Appl.* 135, 237-244.
- Frank, S.D., 2010. Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. *Biol. Control* 52, 8-16.
- Frère Marie-Victorin, É.C., Rouleau, E., Brouillet, L., 2002. *Flore laurentienne*, 3e Édition. ed. Chenelière Éducation, Montréal, Canada.
- Funt, R.C., Hall, H.K., 2013. *Raspberries*, Series: Cr. ed. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK. doi:10.1079/9781845937911.0000
- Gerson, U., Weintraub, P.G., 2007. Mites for the control of pests in protected cultivation. *Pest Manag. Sci.* 63, 658-676. doi:10.1002/ps.1380
- Goleva, I., Zebitz, C.P.W., 2013. Suitability of different pollen as alternative food for the predatory mite *Amblyseius swirskii* (Acari, Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 61, 259-283.
- Gotoh, T., Yamaguchi, K., Mori, K., 2004. Effect of temperature on life history of the predatory mite *Amblyseius (Neoseiulus) californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 32, 15-30. doi:10.1023/B:APPA.0000018192.91930.49
- Greco, N.M., Sánchez, N.E., Liljeström, G.G., 2005. *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) as a potential control agent of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): Effect of pest/predator ratio on pest abundance on strawberry. *Exp. Appl. Acarol.* 37, 57-66. doi:10.1007/s10493-005-0067-7
- Gugole Ottaviano, M.F., Cédola, C. V., Sánchez, N.E., Greco, N.M., 2015. Conservation biological control in strawberry: effect of different pollen on development, survival, and reproduction of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 507-521. doi:10.1007/s10493-015-9971-7
- Hajek, A.E., 2004. *Natural Enemies An Introduction to Biological Control*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hauser, M., 2011. A historic account of the invasion of *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drosophilidae) in the continental United States, with remarks on their identification. *Pest Manag. Sci.* 67, 1352-1357. doi:10.1002/ps.2265
- Heidenreich, C., Pritts, M., Demchak, K., Hanson, E., Weber, C., Kelly, M.J., 2012. *High Tunnel Raspberries and Blackberries, High Tunnel Raspberries and Blackberries*. Department of Horticulture Publication, Cornell University, Cornell, Canada.

- Helle, W., Sabelis, M.W., 1985a. Spider Mites. Their Biology, Natural Enemies and Control. Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam-New York.
- Helle, W., Sabelis, M.W., 1985b. Spider Mites. Their Biology, Natural Enemies and Control. Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam-New York.
- Holtzer, T.O., Norman, J.M., Perring, T.M., Berry, J.S., Heintz, J.C., 1988. Effects of microenvironment on the dynamics of spider-mite populations. *Exp. Appl. Acarol.* 4, 247-264. doi:10.1007/BF01196189
- Hoy, M.A., 2011a. Chapter 6. Tetranychidae : Premier Plant Pests, dans: *Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*. p. 85-102.
- Hoy, M.A., 2011b. Chapter 5. The strategy of Integrated Mite Management, dans: *Boca Raton : CRC Press, 2011. (Éd.), Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*. p. 47-81.
- Hoy, M.A., 2011c. Chapter 12. The Phytoseiidae: Effective Natural Enemies, dans: *Press, C. (Éd.), Agricultural Acarology: Introduction to Integrated Mite Management*: Introduction to integrated mite management. Boca Raton, FL, USA, p. 159-183.
- Hoy, M.A., 2011d. *Agricultural acarology: Introduction to integrated mite management*.
- Huang, N., Enkegaard, A., Osborne, L.S., Ramakers, P.M.J., Messelink, G.J., Pijnakker, J., Murphy, G., 2011. The Banker Plant Method in Biological Control. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 30, 259-278. doi:10.1080/07352689.2011.572055
- Huffaker, C.B., van de Vrie, M., McMurtry, J.A., 1969. The ecology of tetranychid mites and their natural control. *Annu. Rev. Entomol.* 14, 125-174.
- Huot, F., 2012. Sorbaria sorbifolia: en pépinière cette « plante réservoir » a-t-elle un grand potentiel dans la gestion intégrée du tétranyque à deux points? *Québec Vert* 88-91.
- Jain Irrigation, 2010. Dan Fogger/Mister [WWW Document]. Jain Irrig. Inc. URL https://www.jainsusa.com/wp-content/downloads/2015/Brochures/foggers_misters.pdf (consulté le 4.27.16).
- Janssen, A., Sabelis, M.W., 2015. Alternative food and biological control by generalist predatory mites: the case of *Amblyseius swirskii*. *Exp. Appl. Acarol.* 65, 413-418. doi:10.1007/s10493-015-9901-8
- Jeppson, L.R., Keifer, H.H., Baker, E.W., 1975. *Mites injurious to economic plants*, Florida Entomologist. University of California Press, Berkeley, CA, USA.
- Johnson, D.T., Croft, B. a, 1976. Laboratory Study of the Dispersal Behavior of *Amblyseius fallacis* (Acarina: Phytoseiidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 69, 1019-1023.
- Jung, C., Croft, B.A., 2000. Survival and plant-prey finding by *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae) on soil substrates after aerial dispersal. *Exp. Appl. Acarol.* 24, 579-596.
- Jung, C., Croft, B.A., 2001. Aerial dispersal of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae): estimating falling speed and dispersal distance of adult females. *Oikos* 94, 182–190. doi:10.1034/j.1600-0706.2001.11044.x
- Kain, D.P., Nyrop, J.P., 1995. *Tree Fruit Crops Insect Identification Sheet No.123*.
- Kazak, C., Karut, K., Doker, I., 2015. Indigenous populations of *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae): single and combined releases against *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on greenhouse eggplant. *Int. J. Acarol.* 41, 108-114. doi:10.1080/01647954.2015.1008570
- Kennett, C.E., Flaherty, D.L., Hoffman, R.W., 1979. Effect of wind-borne pollens on the population dynamics of *Amblyseius hibisci* (Acarina: Phytoseiidae). *Entomophaga* 24, 83-98. doi:10.1007/BF02377513
- Lacroix, C., Harnois, M., 2013. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 4 – Petits fruits – 8 mai 2013. Québec.
- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G., 2015a. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N°

4 – Petits fruits – 1er mai 2015. Québec.

- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G.-A., 2015b. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 13 – Petits fruits – 17 juillet 2015. Québec.
- Lacroix, C., Tellier, S., Landry, G.-A., 2016. Réseau d'avertissements phytosanitaires – Bulletin d'information N° 3 – Petits fruits – 6 mai 2016.
- Lambert, L., Laplante, G.H., Carisse, O., Vincent, C., 2007. Maladies et ravageurs du framboisier, dans: Centre de Références en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (Éd.), Maladies, ravageurs et organismes bénéfiques du fraisier, du framboisier et du bleuetier. Québec, p. 344.
- Lamotte, E., Fleury, F., 2012. Effect of six insecticides on *Neoseiulus fallacis* : a predatory mite in Canadian vineyards. *Rev. suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 44, 244-248.
- Landry, G.-A., 2013. Framboisiers sous abri- parapluie et grand tunnel : où en sommes-nous?, Les journées horticoles de St-Rémi. St-Rémi.
- Landry, G.-A., Ferland, P., Trépanier, R., Gosselin, A., 2013. Mise à l'essai d'une conduite culturale hors-sol pour le framboisier non remontant.
- Lefebvre, M., Bostanian, N.J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. a, Hardman, J.M., 2012. Laboratory-Based Toxicological Assessments of New Insecticides on Mortality and Fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *J. Econ. Entomol.* 105, 866-871. doi:Doi 10.1603/Ec11260
- Lemaire, É., 2012. La lutte biologique contre les tétranyques dans les framboisières sous tunnels. Université Laval.
- Lemaire, É., Simard, S., 2012. Le *Sorbaria sorbifolia*; plante réservoir de prédateurs naturels du tétranyque à deux points en pépinière.
- Leman, A., Messelink, G.J., 2015. Supplemental food that supports both predator and pest: A risk for biological control? *Exp. Appl. Acarol.* 65, 511-524. doi:10.1007/s10493-014-9859-y
- Leonardi, C., Guichard, S., Bertin, N., 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 84, 285-296. doi:10.1016/S0304-4238(99)00127-2
- Li, S., Tan, X., Desneux, N., Benelli, G., Zhao, J., Li, X., Zhang, F., Gao, X., Wang, S., 2015. Innate positive chemotaxis to pollen from crops and banker plants in predaceous biological control agents: towards new field lures? *Sci. Rep.* 5, 12729. doi:10.1038/srep12729
- Linder, C., Mittaz, C., Carlen, C., 2003a. Biological control of *Tetranychus urticae* on plastic covered raspberries with native and introduced phytoseiids, dans: C. Gordon, S., V. Cross, J. (Éd.), *Integrated Plant Protection in Orchards - Soft Fruits*. IOBC/WPRS, Dundee, Scotland, p. 113-118.
- Linder, C., Mittaz, C., Carlen, C., 2003b. Biological control of *Tetranychus urticae* on plastic covered raspberries with native and introduced phytoseiids. *Integr. Plant Prot. Orchard. - Soft Fruits IOBC/wprs Bull.* 26, 113-118.
- Lundgren, J.G., 2009. Relationships of Natural Enemies and Non-Prey Foods, *Progress in Biological Control*. Springer Science & Business Media, New York. doi:10.1007/978-1-4020-9235-0_4
- McMurtry, J.A., Croft, B. A., 1997. Life-styles of Phytoseiid mites and their roles in biological control. *Annu. Rev. Entomol.* 42, 291-321. doi:10.1146/annurev.ento.42.1.291
- McMurtry, J.A., Huffaker, C.B., Van de Vrie, M., 1970. Ecology of tetranychid mites and their natural enemies: A review. I. Tetranychid enemies: Their biological characters and the impact of spray practices. *Hilgardia* 40, 331-392.
- McMurtry, J.A., Moraes, G.J.D.E., Sourassou, N.F., 2013. Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari : Phytoseiidae). *Syst. Appl. Acarol. Soc.* 18, 297-320.

- McMurtry, J.A., Scriven, G.T., 1964. Studies on the Feeding, Reproduction, and Development of *Amblyseius hibisci* (Acarina: Phytoseiidae) on Various Food Substances. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 57, 649-655. doi:<http://dx.doi.org/10.1093/aesa/57.5.649>
- Messelink, G.J., Bennisson, J., Alomar, O., Ingegno, B.L., Tavella, L., Shipp, L., Palevsky, E., Wäckers, F.L., 2014. Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl* 59, 377-393. doi:10.1007/s10526-014-9579-6
- Monetti, L.N., Croft, B.A., 1997a. Mating, cross-mating and related behaviours of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 21, 67-74.
- Monetti, L.N., Croft, B.A., 1997b. *Neoseiulus californicus* (McGregor) and *Neoseiulus fallacis* (Garman): larval response to prey and humidity, nymphal feeding drive and nymphal predation on phytoseiid eggs. *Exp. Appl. Acarol.* 21, 225-234. doi:10.1023/a:1018442820736
- Monteiro, V.B., Gondim, M.G.C., de M. Oliveira, J.E., Siqueira, H. a. a., Sousa, J.M., 2015. Monitoring *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) resistance to abamectin in vineyards in the Lower Middle São Francisco Valley. *Crop Prot.* 69, 90-96. doi:10.1016/j.cropro.2014.12.012
- Nagelkerke, C.J., Sabelis, M.W., 1998. Precise control of sex allocation phytoseiid mites. *J. Evol. Biol.* 11, 649-684.
- Navajas, M., 1998. Host plant associations in the spider mite *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): insights from molecular phylogeography 22, 201-214.
- Park, H.-H., Shipp, L., Buitenhuis, R., Ahn, J.J., 2011. Life history parameters of a commercially available *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae) fed on cattail (*Typha latifolia*) pollen and tomato russet mite (*Aculops lycopersici*). *J. Asia. Pac. Entomol.* 14, 497-501. doi:10.1016/j.aspen.2011.07.010
- Parolin, P., Bresch, C., Bout, A., Ruiz, G., Poncet, C., Desneux, N. 2012. Testing banker plants for predator installation. *Acta Hort.* 927, 211-217. doi: 10.17660/ActaHortic.2012.927.23
- Parolin, P., Bresch, C., Ruiz, G., Desneux, N., Poncet, C., 2013. Testing banker plants for biological control of mites on roses. *Phytoparasitica* 41, 249-262.
- Pimentel, D., Andow, D., Dyson-hudson, R., Gallahan, D., Irish, M., Kroop, S., Moss, A., Schreiner, I., Shepard, M., Pimentel, D., Andow, D., Dyson-hudson, R., Gallahan, D., Jacobson, S., Irish, M., Moss, A., Schreiner, I., Shepard, M., Thompson, T., Vinzant, B., 1980. Environmental and Social Costs of Pesticides : A Preliminary Assessment. *Oikos* 34, 126-140.
- Pimentel, D., Burgess, M., 2014. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States, dans: *Integrated Pest Management*. doi:10.1007/978-94-007-7796-5_2
- Pina, T., Argolo, P.S., Urbaneja, A., Jacas, J. a., 2012. Effect of pollen quality on the efficacy of two different life-style predatory mites against *Tetranychus urticae* in citrus. *Biol. Control* 61, 176-183. doi:10.1016/j.biocontrol.2012.02.003
- Polis, G.A., Myers, C.A., Holt, R.D., 1989. The Ecology and Evolution of Intraguild Predation: Potential Competitors That Eat Each Other. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20, 297-330.
- Pomerantz, A.F., Hoy, M. a., 2014. Expression analysis of *Drosophila doublesex*, *transformer-2*, *intersex*, *fruitless-like*, and *vitellogenin* homologs in the parahaploid predator *Metaseiulus occidentalis* (Chelicerata: Acari: Phytoseiidae). *Exp. Appl. Acarol.* 65, 1-16. doi:10.1007/s10493-014-9855-2
- Pratt, P.D., Croft, B.A., 2000. Banker Plants : Evaluation of release strategies for predatory mites. *J. Environ. Hortic.* 18, 211-217.
- Pratt, P.D., Monetti, L.N., Croft, B.A., 1998. Within-and between-plant dispersal and distributions of *Neoseiulus californicus* and *N. fallacis* (Acari: Phytoseiidae) in simulated bean and apple plant systems. *Environ. Entomol.* 27, 148-153.

- Pratt, P.D., Schausberger, P., Croft, B.A., 1999. Prey-food types of *Neoseiulus fallacis* (Acari:Phytoseiidae) and literature versus experimentally derived prey-food estimates for five phytoseiid species. *Exp. Appl. Acarol.* 23, 551-565.
- Rahn, K., 1989. A survey of the genus *Sorbaria* (Rosaceae). *Nord. J. Bot.* 8, 557-563.
- Reding, M.E., Alston, D.G., Thomson, S. V., Stark, A. V., 2001. Association of powdery mildew and spider mite populations in apple and cherry orchards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 84, 177-186. doi:10.1016/S0167-8809(00)00204-8
- Roda, A., Nyrop, J., Dicke, M., English Loeb, G., 2000. Trichomes and spider-mite ebbing protect predatory mite eggs from intraguild predation. *Oecologia* 125, 428-435.
- Romero, G.Q., Benson, W.W., 2005. Biotic interactions of mites, plants and leaf domatia. *Curr. Opin. Plant Biol.* 8, 436-440. doi:10.1016/j.pbi.2005.05.006
- Rota-Stabelli, O., Blaxter, M., Anfora, G., 2013. *Drosophila suzukii*. *Curr. Biol.* 23, R8-R9. doi:10.1016/j.cub.2012.11.021
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 1999. Seasonal abundance of spider mites and their predators on red raspberry in Quebec, Canada. *Environ. Entomol.* 735-747.
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 2002. Relationship between temperature and developmental rate of *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) and its prey *Tetranychus mcdanieli* (Acarina: Tetranychidae). *Environ. Entomol.* 31, 177-187.
- Roy, M., Brodeur, J., Cloutier, C., 2005. Seasonal activity of the spider mite predators *Stethorus punctillum* (Coleoptera: Coccinellidae) and *Neoseiulus fallacis* (Acarina: Phytoseiidae) in raspberry, two predators of *Tetranychus mcdanieli* (Acarina: Tetranychidae). *Biol. Control* 34, 47-57.
- Sabelis, M.W., 1981. Biological control of two-spotted spider mites using phytoseiid predators . Part I Modelling the predator-prey interaction at the individual level. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Sabelis, M.W., Nagelkerke, C.J., 1988. Evolution of Pseudo-Arrhenotoky. *Exp. Appl. Acarol.* 4, 301-318.
- Sabelis, M.W., Van De Baan, H.E., 1983. Location of distant spider mite colonies by phytoseiid predators: Demonstration of specific kairomones emitted by *Tetranychus urticae* and *Panonychus ulmi*. *Entomol. Exp. Appl.* 33, 303-314. doi:10.1007/BF02995188
- Sonneveld, T., Wainwright, H., Labuschagne, L., 1996. Development of two spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) populations on strawberry and raspberry cultivars. *Ann. Appl. Biol.* 129, 405-413. doi:10.1111/j.1744-7348.1996.tb05764.x
- Stacey, D.L., 1977. « Banker » Plant Production of *Encarsia formosa* Gahan and its Use in the Control of Glasshouse Whitefly on Tomatoes. *Plant Pathol.* 26, 63-66. doi:10.1111/j.1365-3059.1977.tb01025.x
- Suzuki, M., Umeda, H., Matsuo, S., Kawasaki, Y., Ahn, D., Hamamoto, H., Iwasaki, Y., 2015. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 187, 44-49. doi:10.1016/j.scienta.2015.02.035
- Therriault, E., Tellier, S., Fournier, V., Bergeron, D., Rochefort, S., Pouliot, D., Langlois, D., 2013. Adaptation de la méthode des plantes-réservoirs pour le contrôle des tétranyques à deux points sur le framboisier sous grands tunnels, Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur.
- Tixier, M.S., Kreiter, S., Douin, M., 2012. E-Taxonomy of Phytoseiidae mite family [WWW Document]. URL <http://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/phytoseiidae/index.html> (consulté le 2.15.16).
- van de Vrie, M., McMurtry, J.A., Huffaker, C.B., 1972. Ecology of Tetranychid mites and their natural enemies: a review. III. Biology, ecology, and pest status, and host-plant relations of tetranychids. *Hilgardia* 41, 343-432.

- van Houten, Y.M., Veenendaal, R.L., 1990. Effects of photoperiod, temperature, food and relative humidity on the induction of diapause in the predatory mite *Amblyseius potentillae*. *Exp. Appl. Acarol.* 10, 111-128.
- Van Leeuwen, T., Vontas, J., Tsagkarakou, A., Dermauw, W., Tirry, L., 2010. Acaricide resistance mechanisms in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and other important Acari: A review. *Insect Biochem. Mol. Biol.* 40, 563-572. doi:10.1016/j.ibmb.2010.05.008
- van Lenteren, J.C., 2011. The state of commercial augmentative biological control: Plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl* 57, 1-20. doi:10.1007/s10526-011-9395-1
- Vangansbeke, D., Nguyen, D.T., Audenaert, J., Verhoeven, R., Gobin, B., Tirry, L., De Clercq, P., 2014. Food supplementation affects interactions between a phytoseiid predator and its omnivorous prey. *Biol. Control* 76, 95-100. doi:10.1016/j.biocontrol.2014.06.001
- Vangansbeke, D., Nguyen, D.T., Audenaert, J., Verhoeven, R., Gobin, B., Tirry, L., De Clercq, P., 2015. Supplemental food for *Amblyseius swirskii* in the control of thrips: Feeding friend or foe? *Pest Manag. Sci.* 72, 466-473. doi:10.1002/ps.4000
- Vantornhout, I., Minnaert, H., Tirry, L., De Clercq, P., 2004. Effect of pollen, natural prey and factitious prey on the development of *Iphiseius degenerans*. *BioControl* 49, 627-644. doi:10.1007/s10526-004-5280-5
- Villeneuve, C., 2011. Portrait des grands tunnels au Québec et à l'étranger.
- Walzer, A., Castagnoli, M., Simoni, S., Liguori, M., Palevsky, E., Schausberger, P., 2007. Intraspecific variation in humidity susceptibility of the predatory mite *Neoseiulus californicus*: Survival, development and reproduction. *Biol. Control* 41, 42-52. doi:10.1016/j.biocontrol.2006.11.012
- Whalon, M.E., Mota-Sanchez, R.M., Hollingworth, R.M., 2016. Arthropod Pesticide resistance Database (APRD) [WWW Document]. 2016. URL <http://www.pesticideresistance.org> (consulté le 2.23.16).
- Wien, H.C., 2009. Microenvironmental variations within the high tunnel. *HortScience* 44, 235-238.
- Wood, L.A., 1992. Biological control of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch, in raspberries using the predatory mite, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot. Simon Fraser University.
- Xu, Q., Gosselin, A., Desjardins, Y., 2014. Red Raspberries Production under High Tunnel , Umbrella-like Structure and Open Field under Northern Canadian Climate. *Acta Hort.* 1037, 771-776. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1037.101
- Yorulmaz Salman, S., Sarıtaş, E., 2014. Acequinocyl resistance in *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae): inheritance, synergists, cross-resistance and biochemical resistance mechanisms. *Int. J. Acarol.* 40, 428-435. doi:10.1080/01647954.2014.944932
- Zhang, Z.-Q., 2003. Mites of Greenhouses Identification, Biology and Control. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK. doi:10.1079/9780851995908.0000

