

ÉMILIE LEMAIRE

**LA LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE LES
TÉTRANYQUES DANS LES FRAMBOISIÈRES SOUS
TUNNELS**
**Introduction d'acariens phytoséiides et modèle de simulation
dynamique**

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

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

2012

© Émilie Lemaire, 2012

Résumé

L'objectif principal du projet était d'évaluer l'efficacité des lâchers d'acariens prédateurs phytoséiides (*Neoseiulus fallacis*, *N. californicus* et *Phytoseiulus persimilis*) à réprimer les tétranyques dans la culture du framboisier remontant sous tunnel. Les résultats suggèrent que l'introduction d'acariens prédateurs est une méthode de lutte contre les tétranyques réaliste permettant de réduire l'utilisation d'acaricide dans ce nouveau système de production sans nuire à la qualité de la récolte. Toutefois, des taux de lâchers suffisamment élevés et des conditions de température et d'humidité appropriés doivent être respectés pour assurer le succès de la lutte biologique et intégrée. L'objectif secondaire était de modéliser l'évolution des populations de tétranyques, afin de mieux comprendre la dynamique des populations observées sous tunnels. Le modèle développé prédit adéquatement l'explosion et l'abondance des populations dans le temps et démontre que l'augmentation de la température sous tunnel est un paramètre critique régissant la prédation et l'accroissement des populations de tétranyques.

Abstract

The main objective of this project was to evaluate the effectiveness of releases of phytoseiid predatory mites (*Neoseiulus fallacis*, *N. californicus* and *Phytoseiulus persimilis*) to suppress spider mites in high tunnel raspberries. Results suggested that phytoseiid releases are a realistic way to control spider mites and to reduce the use of acaricide in this new production system without compromising the quality of the crop. However, temperature and humidity conditions must be suitable to achieve successful establishment of predators and release rates must be sufficiently high to promote acceptable pest control. The second objective was to model the evolution of mite populations to better understand the dynamics observed under tunnels. The model developed describes the spider mite outbreak and abundance over time with a good fit. It shows that higher temperature under tunnel is a critical parameter governing predation and spider mite population increase.

Avant-Propos

Le présent mémoire est la finalité d'un projet rendu possible grâce à l'attribution d'une subvention de recherche du MAPAQ dans le cadre du Programme de Soutien à l'Innovation Horticole (PSIH) et l'implication des organisations suivantes : l'entreprise Les Fraises de l'Île d'Orléans inc., le laboratoire de diagnostic en phytoprotection, le centre de recherche en horticulture (CRH) et le distributeur d'agents de lutte biologique Plant Prod Québec, l'Association des producteurs de fraises et framboises du Québec et le CRSNG et le FQRNT pour le financement d'une bourse de recherche en milieu de pratique (BMP Innovation).

Le chapitre 2 de ce document constitue le corps du mémoire. Il est rédigé en anglais sous forme d'article en vue d'une soumission au périodique scientifique Biological Control. Le manuscrit intitulé « Efficacy of releases of Phytoseiid Mites (Acari: Phytoseiidae) and a temperature-driven population model of *Tetranychus mcdanieli* (Acari: Tetranychidae) on raspberries grown under high tunnel cropping » a été rédigé en collaboration avec les Drs Valérie Fournier, Michèle Roy et Gaétan Bourgeois. Les autres sections de mon mémoire, soit l'introduction générale et la conclusion générale, ont été rédigées en français. L'ensemble des références citées est présenté dans une bibliographie placée immédiatement après la conclusion.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie ma directrice, Valérie Fournier, de m'avoir soutenue et encouragée jusqu'à la fin de cette longue aventure. Je remercie également ma codirectrice, Michèle Roy, de m'avoir partagé ses nombreuses connaissances sur la lutte intégrée contre les tétranyques dans la production de la framboise et pour ses encouragements et ses remarques constructives. Je remercie mon codirecteur Gaétan Bourgeois de m'avoir guidée dans ce qui me semblait parfois un labyrinthe sans fin : la modélisation bioclimatique.

Je remercie également toute l'équipe des Fraises de l'Île d'Orléans. Je la remercie tout d'abord d'avoir initié ce projet, mais surtout pour la coopération et le soutien technique et matériel qu'elle m'a offert.

Merci à Serge Gagnon (Plant-Prod Québec), Sébastien Jacob (Biobest Biological Systems) et Thierry Chouffot (Koppert Biological Systems) pour leurs précieux conseils sur les acariens prédateurs et la lutte biologique.

Merci particulier à Mario Fréchette (MAPAQ) et Frédéric Beaulieu (AAC) pour leur expertise en taxonomie des acariens. Ils ont contribué à de belles découvertes.

Merci à Conrad Cloutier d'avoir accepté d'être examinateur pour mon mémoire et pour ses judicieux conseils.

Merci à Hélène Crépeau (Département de Mathématiques et de Statistiques, FSG) pour l'aide statistique et les réponses à mes nombreuses questions.

Je remercie le Programme de soutien à l'innovation horticole du MAPAQ pour la contribution financière au projet, ainsi que le FQRNT et le CRSNG pour l'attribution d'une bourse de recherche.

Je remercie sincèrement Andrée Rousseau, François Lefebvre et Joseph Moisan-De Serres, qui se sont abimés les yeux à compter de nombreux acariens et égratigné les doigts à prélever des folioles de framboisiers sans jamais perdre leur sourire. Merci à mes collègues et amies, Marine Marel et Mélissa Girard, pour leur aide technique, mais aussi pour leur présence et leur écoute. Merci Mel pour les cours de couture!

Pour terminer, je remercie mes parents, ma sœur et mes amis pour leur appui et leurs encouragements tout au long de la réalisation de ma maîtrise. Et surtout, merci Olivier pour ta patience et ta compréhension. Merci d'avoir partagé avec moi les meilleurs comme les pires moments de cette aventure. Merci également pour ton support technique. Je me rappellerai longtemps de nos balades dans les tunnels à la lueur de nos lampes frontales à la recherche de noctuelles ou à faire l'introduction de prédateurs.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract	iii
Avant-Propos	iv
Remerciements.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	x
Chapitre 1: Introduction générale	1
1.1 La problématique des tétranyques dans les framboisières sous tunnels	2
1.2 <i>Tetranychus urticae</i> Koch et <i>T. mcdanieli</i> McGregor (Acarina: Tetranychidae)	5
1.2.1 Description.....	5
1.2.2 Cycle de vie.....	6
1.2.3 Méthodes de lutte contre les tétranyques	8
1.3 Les acariens phytoséiides acariphages	10
1.3.1 Description.....	10
1.3.2 Cycle de vie.....	12
1.3.3 Activité prédatrice.....	14
1.3.4 Compatibilité avec les pesticides	18
1.3.5 La lutte biologique contre les tétranyques dans les petits fruits	19
1.3.6 Influence de la température et de l'humidité sur les fonctions biologiques des prédateurs.....	21
1.4 Dynamique de population des tétranyques sous tunnels; approche de modélisation bioclimatique.....	23
1.4.1 Approches de caractérisation de la dépendance thermique des arthropodes et modélisation de dynamique de population	24
1.4.2 Fonctions de réponse des acariens	26
1.5 Hypothèses et Objectifs :	28
Chapitre 2:.....	29
2.1 Résumé.....	30
2.2 Abstract	30
2.3 Introduction.....	31
2.4 Materials and methods	33
2.4.1 Field experiments	33
2.4.2 Description of the population dynamics model	37
2.4.3 Model testing.....	42
2.5 Results	42
2.5.1 Field Experiments	42
2.5.2 Model simulation	45

2.6 Discussion	48
2.6.1 Field experiments	48
2.6.2 Model	52
2.7 Acknowledgments	55
Chapitre 3: Conclusion générale	70
3.1 La lutte aux tétranyques par l'introduction d'acariens prédateurs phytoséiides	71
3.2 Optimisation des conditions climatiques sous tunnels	73
3.3 Modèle de simulation dynamique	74
Bibliographie	76

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Estimated values of parameters used in each equation of the dynamic population model.....	57
--	----

Liste des figures

- Figure 2.1** Simplified diagram of *T. mcdanieli* model; *Imm*: immatures; *A*: adults; *NA*: normalised age; *DR*: development rate; *MR*: maturation rate; *Pr*: predation; *M*: age dependant mortality; *DO*: daily oviposition; *Pr*: predation rate.56
- Figure 2.2** Weekly average spider mites (-SEM) in Experiment 1 (May to July 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec; (a) motiles and (b) eggs per leaflet (A = Apollo, *N.c.* + *P.p.* = *N. californicus* and *P. persimilis* combined release, *N.f.* + *P.p.* = *N. fallacis* and *P. persimilis* combined release. Black arrows represent the application of clofentezine; Grey arrows represent the predatory mite releases.58
- Figure 2.3** Species composition of weekly *Neoseiulus spp.* and *Amblyseius sp.* adults identified in Experiment 1 (May to July 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec.59
- Figure 2.4** Weekly average spider mites (+SEM) in Experiment 2 involving artificial mist (August to October 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec; (a) motiles and (b) eggs per leaflet. Grey arrows represent the *Phytoseiulus persimilis* releases.60
- Figure 2.5** Weekly average of *Phytoseiulus persimilis* motiles per leaflet in Experiment 2 (August to October 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec. Grey arrows *Phytoseiulus persimilis* releases.61
- Figure 2.6** Minimum, maximum and mean temperatures recorded in raspberry under high tunnel during season 2009. Dashed lines show minimum and maximum temperature thresholds for *N. fallacis*, *N. californicus* and *P. persimilis* activity.62
- Figure 2.7** Comparison of the *T. mcdanieli* model simulation outputs, with and without mortality factor, with the sampling data (Experiment 1) in a) *N. californicus* and *P. persimilis* combined release treatment and b) *N. fallacis* and *P. persimilis* combined release treatment.63
- Figure 2.8** Sensitivity of model predictions to initial spider mite density (immatures and adults) parameter.64
- Figure 2.9** Sensitivity of model predictions to temperature-dependent total fecundity parameter.65
- Figure 2.10** Sensitivity of model predictions to the sex-ratio parameter66
- Figure 2.11** Sensitivity of model predictions to the maximum development/maturation rate parameter a) immature; b) adult.67
- Figure 2.12** Sensitivity of model predictions to the age-specific mortality rate parameter .68
- Figure 2.13** Sensitivity of model predictions to the lower temperature threshold for predator activity parameter69

Chapitre 1: Introduction générale

1.1 La problématique des tétranyques dans les framboisières sous tunnels

Au Québec, la valeur des importations de framboises fraîches a doublé entre 2003 et 2006 (MAPAQ et ISQ 2007). Bien que l'intérêt des Québécois à consommer localement soit grandissant, le climat québécois ne permet pas de répondre à la demande en petits fruits frais pendant toute l'année. Depuis le début des années 2000, plusieurs producteurs de framboises ont adopté un nouveau mode de production, la culture du framboisier remontant sous tunnels. L'utilisation des tunnels permet d'augmenter les températures moyennes de près de 5°C et, par le fait même, de devancer et prolonger la période de récolte et d'ouvrir aux producteurs d'ici une partie du marché de la framboise d'automne jusqu'à maintenant réservée aux importations. En plus d'allonger la saison de végétation, les tunnels offrent une protection contre les forts vents et les précipitations. Cela peut se traduire en une diminution de l'incidence des maladies fongiques, une augmentation de la qualité et de la durée de conservation des fruits. Par contre, les températures plus élevées peuvent favoriser les problématiques d'insectes et d'acariens ravageurs, particulièrement celles des tétranyques.

Les tétranyques sont considérés depuis plusieurs années comme des ravageurs d'importance économique dans plusieurs cultures, notamment celle du framboisier (Pritchard et Baker 1955). Les tétranyques, qui se nourrissent du contenu des cellules végétales, peuvent entraîner une diminution de la transpiration et de la photosynthèse (Sances *et al.* 1979), une défoliation prématurée des plants et une diminution de la qualité des fruits (Roy *et al.* 1999). Aucune relation claire de la densité de tétranyques par foliole et du pourcentage de défoliation des plants avec les pertes de rendement annuelles n'a encore été établie quantitativement (Raworth 1989; Raworth et Clements 1996). Bien qu'à court terme les plants semblent tolérer un taux d'infestation allant jusqu'à 100 tétranyques par folioles (Raworth 1989), une défoliation prématurée des plants peut nuire à l'accumulation

de réserves et augmenter la vulnérabilité des bourgeons aux rigueurs de l'hiver (Doughty *et al.* 1972). Dans une culture pérenne comme celle du framboisier, l'impact d'une infestation de tétranyques est donc cumulatif d'une année à l'autre. De plus, lors de fortes infestations, les toiles produites par les tétranyques peuvent recouvrir les fruits et entraîner des pertes de rendement indirectes en diminuant leur qualité et leur accessibilité pour les cueilleurs.

Au Canada, très peu d'acaricides sont homologués avant la récolte dans la culture de la framboise et les récoltes rapprochées limitent les possibilités d'utilisation des acaricides en cours de production (voir section 1.2.3 pour plus de détails sur la lutte chimique). La problématique croissante des infestations de tétranyques, le nombre restreint de matières actives disponibles et l'efficacité partielle de celles homologuées ont motivé, dans les années 90, le développement d'une approche de lutte intégrée contre les tétranyques dans les framboisières conventionnelles (Roy 2002). Le complexe de tétranyques présent dans les framboisières québécoises et leurs prédateurs associés a été caractérisé dans trois systèmes de production, soit conventionnel, sans pesticides et naturel (Roy *et al.* 1999; Roy 2002). L'acarien phytoséide *Neoseiulus fallacis* Garman (Acari : Phytoseiidae) et la coccinelle acariphage *Stethorus punctillum* Weise (Coleoptera : Coccinellidae) ont été identifiés comme les principaux prédateurs. *Neoseiulus fallacis*, le prédateur le plus abondant dans le système de production conventionnel (Roy *et al.* 1999), peut être considéré comme un facteur de régulation important des populations de tétranyques dans les framboisières québécoises car son arrivée est bien synchronisée avec celle de sa proie et il est présent tout au long de la saison (Roy *et al.* 2005). Le ratio prédateur : proie est par contre déterminant pour la régulation des populations de tétranyques par les prédateurs (Roy *et al.* 2005; Bounfour et Tanigoshi 2002).

Les cultures pérennes permettent généralement l'utilisation d'une approche de lutte biologique de conservation, c'est-à-dire une modification de l'environnement pour préserver et augmenter les populations d'ennemis naturels (Nyrop *et al.* 1998; Hajek 2004a). *Neoseiulus fallacis* est considéré comme un prédateur adéquat pour cette approche (Nyrop *et al.* 1998), par contre, les pratiques culturales utilisées dans la culture des framboisiers remontants sous tunnels l'apparentent davantage à une culture annuelle que

pérenne. En effet, la coupe des plants et le retrait de ce matériel végétal, avant que l'ensemble des individus ne soit en diapause, peuvent nuire au développement d'un équilibre entre le prédateur et sa proie (Strong et Croft 1995). De plus, les femelles qui migrent vers le sol pour la diapause hivernale, avant que les plants ne soient coupés, sont sujettes à une mortalité hivernale (Overmeer 1985a). Alors, bien que la sortie de diapause des tétranyques soit synchronisée avec celle de leur prédateur *N. fallacis* (Bounfour et Tanigoshi 2002; Roy *et al.* 2005), les populations printanières de ce dernier peuvent être faibles et insuffisantes après un hiver rigoureux. Une approche de lutte biologique augmentative est à considérer pour ce nouveau système de production.

Une densité de tétranyques seuil par foliole et un taux de lâcher ont été établis pour l'introduction de *N. fallacis* dans la production conventionnelle de framboisiers (Caron *et al.* 2000), mais cette stratégie n'a jamais été évaluée dans la culture du framboisier remontant sous tunnels au Québec. Dans ce type de production, les nouveaux cultivars à croissance rapide et au feuillage dense qui sont utilisés, offrent de nombreux refuges aux tétranyques et peuvent modifier la dynamique entre prédateurs et proies (voir Strong et Croft 1995).

Les conditions de températures et d'humidité sont déterminantes pour la réussite de la lutte biologique (van Lenteren et Woets 1988). Les infestations de tétranyques sont favorisées sous des conditions chaudes et sèches. Dans les cultures non couvertes, de fortes précipitations et un taux d'humidité de l'air élevé peuvent être des facteurs naturels de régulation des populations de tétranyques (Jeppson *et al.* 1975) et certaines années l'utilisation de méthodes de lutte peut être évitée. L'utilisation des tunnels modifie les conditions environnementales à la faveur des tétranyques en offrant une protection contre les précipitations et en augmentant la température (Wildung et Johnson 2004). Les conditions sous tunnels semblent plus favorables à l'utilisation d'agents de lutte biologique que les conditions extérieures. Toutefois, les tunnels ne permettent pas une stabilité thermique et hygrométrique comme il est possible d'observer sous serres; des variations journalières de l'ordre de 25°C et de 70% d'humidité relative peuvent être observées (É. Lemaire obs. pers.).

La dynamique de population des tétranyques et de leurs prédateurs n'étant pas connue sous ces nouvelles conditions, les stratégies d'introduction développées en champs, en serres ou sous tunnels dans d'autres régions du monde doivent être évaluées et adaptées pour ce type de production au Québec.

1.2 *Tetranychus urticae* Koch et *T. mcdanieli* McGregor (Acarina: Tetranychidae)

1.2.1 Description

Les tétranyques appartiennent à la classe des Arachnides, à l'ordre des Acari, au sous-ordre des Prostigmates et à la famille des Tetranychidae. L'étude taxonomique des tétranyques a débuté en 1913 avec les travaux d'Ewing (Gutierrez 1985). En 2003, Zhang énonce qu'à ce jour la famille des Tetranychidae compte mondialement 1 200 espèces réparties dans 70 genres. Un grand nombre de ces espèces ont été répertoriées comme ravageurs d'importance économique dans les cultures fruitières, par exemple : *Tetranychus cinnabarinus* Boisdu, *Panonychus ulmi* Koch, *T. turkestani* (Ugarov & Nokolski) et *T. pacificus* McGregor (Jeppson *et al.* 1975). Dans les framboisiers conventionnels, *T. urticae* Koch a été rapportée comme l'espèce dominante à travers le monde. Au Québec, l'espèce *T. mcdanieli* McGregor domine sur *T. urticae* dont l'arrivée est plus tardive. (Roy *et al.* 1999).

Tetranychus urticae est une espèce cosmopolite bien connue en Amérique du Nord sous le nom de tétranyque à deux points. Alors que plusieurs espèces sont associées à une minorité de plantes hôtes, *T. urticae* a été répertorié sur plus de 150 plantes hôtes d'importance économique sous climat tempéré (Jeppson *et al.* 1975). Cela lui vaut le titre d'espèce de tétranyque la plus polyphage répertoriée (Zhang 2003). Ses chances de survie sont grandement augmentées grâce à cette polyphagie.

Tetranychus mcdanieli a été observé et décrit pour la première fois en 1931 dans une production de framboises au Michigan (Nielsen 1958). En 1955, Pritchard et Baker ont statué que *T. mcdanieli* est un ravageur d'importance économique dans la culture de la

pomme, de la prune, des pruneaux et de la framboise. Il est bien distribué à travers les États-Unis et le Canada où il se développe sur une multitude de plantes fruitières et ornementales (Jeppson *et al.* 1975).

Les tétranyques s'installent généralement sur la face inférieure des feuilles, qu'ils transpercent à l'aide de leurs stylets chélicéraux pour extraire le contenu des cellules végétales (Tomczyk et Kropczynska 1985). L'impact individuel d'un tétranyque sur une plante est minime et les symptômes peuvent se limiter à des ponctuations jaunes observées sur la face supérieure des feuilles. Par contre, leur fort potentiel de reproduction permet une croissance rapide des colonies et l'effet combiné de l'ensemble des individus entraîne rapidement un jaunissement ou un bronzage généralisé de la feuille. Les tétranyques se reproduisent par voie sexuée et par parthénogenèse de type arrhénotoque. C'est-à-dire que les œufs fécondés donnent des femelles et les œufs non fécondés se développent pour produire des mâles haploïdes. Le sexe ratio est en moyenne de 1 mâle pour 3 femelles (Helle et Pijnacker 1985).

À forte densité, les tétranyques du genre *Tetranychus* tissent des toiles aux multiples fonctions. Ces toiles facilitent leurs déplacements, leur offrent une protection contre les prédateurs, les intempéries climatiques et peuvent même créer une barrière contre les acaricides (Gerson 1985). Les toiles peuvent être responsables des pertes de rendement indirectes lorsqu'elles recouvrent les fruits, en diminuant leur qualité et leur accessibilité pour les cueilleurs. De plus, certaines espèces de tétranyques sont responsables de la transmission de virus à la plante hôte, ce qui peut entraîner des pertes de rendement supplémentaires (Jeppson *et al.* 1975).

1.2.2 Cycle de vie

Au Québec, de 4 à 6 générations de tétranyques ont été observées dans les framboisières conventionnelles (Caron *et al.* 2000). La température est le facteur ayant le plus d'impact sur leur développement. Par exemple, à une température constante de 16°C, *T. mcdanieli* a besoin de 30 jours pour compléter une génération (œuf à adulte) tandis qu'à 20, 30 et 34°C, il a besoin de 16, 7 et 6 jours, respectivement (Roy *et al.* 2002). *Tetranychus urticae*

et *T. mcdanieli* passent l'hiver en diapause dans la litière au niveau du sol, au stade de femelle adulte fécondée (Veerman 1985). Au printemps, les femelles hivernantes reprennent leur activité avec l'augmentation de la photopériode et de la température, au dessus de leur seuil de développement de 12°C (Jeppson *et al.* 1975; Caron *et al.* 2000). Elles s'installent alors sur les mauvaises herbes ou sur les jeunes bourgeons de framboisier pour s'alimenter. Au moment où les femelles commencent à se nourrir, leur couleur orangée typique de la diapause hivernale disparaît progressivement pour laisser place à une teinte de vert. Selon les conditions climatiques, les femelles amorcent la ponte dans les jours suivant ce changement de couleur (Nielsen 1958).

Le cycle de développement compte cinq stades, soit l'œuf, la larve, la protonympe, la deutonympe et l'adulte. Les œufs de très petite taille (0,13 mm) sont laissés par les femelles directement sur la surface foliaire ou dans les toiles en dessous des feuilles. À leur sortie du chorion, les larves incolores à trois paires de pattes ne sont pas plus grosses que ne l'étaient les œufs. Elles prennent ensuite une teinte verte et s'allongent. Avant de muer vers le stade suivant, les larves, les protonymphes et les deutonymphes passent par une période de quiescence qui est appelée respectivement proto-, deuto- et teleiochrysalide (Feiertag-Koppen et Pijnacker 1985). La quatrième paire de pattes est visible suite à la première mue. Le mince corps des mâles peut être distingué facilement de celui des femelles à la fin du stade de deutonympe. Les protonymphes et les deutonymphes sont généralement vert foncé, mais tout comme celle des adultes, leur couleur peut varier selon la plante hôte. Les femelles adultes de forme ovale (0,44 mm de long et 0,21 mm de large) ont généralement des points foncés caractéristiques de l'espèce. Après une courte période, la femelle adulte initie la ponte. La même femelle peut déposer jusqu'à 200 œufs (Jeppson *et al.* 1975). Tous les stades mobiles s'alimentent sur la plante. À forte densité, lorsque la qualité de leur ressource diminue, les femelles fécondées migrent vers le haut des plants (Walzer *et al.* 2009) ou vers les plants adjacents en marchant, à l'aide de leurs toiles ou en se laissant porter par des courants d'air (Kennedy et Smitley 1985). Dans les framboisières conventionnelles, à partir du début août, la diminution de la photopériode et de la température, en plus de la baisse de qualité de la plante hôte induit l'entrée en diapause des

femelles (Jeppson *et al.* 1975; Caron *et al.* 2000). Elles cessent alors de s'alimenter, prennent une couleur orangée caractéristique et une fois fécondées, elles migrent vers la base des plants pour s'abriter.

1.2.3 Méthodes de lutte contre les tétranyques

Comme il a été mentionné précédemment, un nombre limité d'acaricides est homologué dans la culture de la framboise au Canada. La lutte chimique est malgré tout la méthode de lutte la plus répandue. Avant la récolte, quatre matières actives peuvent être envisagées, soit la clofentézine, le dicofol, le bifénazate, et les savons insecticides.

L'acaricide Apollo, dont la matière active est la clofentézine, n'a pas d'impact sur les adultes et permet uniquement de réduire la densité d'œufs et de jeunes larves. La lutte chimique reposait jusqu'à très récemment sur l'utilisation de cet acaricide faiblement toxique pour les prédateurs (Caron *et al.* 2000). Un délai de 15 jours doit être respecté avant la récolte et la simple application annuelle permise n'est également pas suffisante. De plus, des cas de résistance à cette matière active ont déjà été répertoriés (Zhang 2003). Le Kelthane, dont la matière active est le dicofol, peut être appliqué une fois par saison, au minimum sept jours avant la récolte. Cette matière active a un impact seulement sur les tétranyques femelles adultes et est très toxique pour les prédateurs de tétranyques (CRAAQ 2010). Son utilisation n'est pas très recommandée. Une seule application ne suffit pas à maintenir les tétranyques à un niveau acceptable jusqu'à la fin de la saison de croissance (Shanks *et al.* 1992). Les délais avant la récolte sont problématiques lorsqu'un traitement doit être effectué en cours de récolte. Les savons insecticides Safer's ont l'avantage d'avoir un délai d'application d'une journée avant la récolte. Par contre, ceux-ci sont toxiques pour les prédateurs et les plantes et leur efficacité est variable (Caron *et al.* 2000). Depuis mai 2010, l'acaricide Acramite, dont la matière active est le bifénazate, est homologué en pré-récolte. Ce produit faiblement toxique pour les acariens prédateurs cible les formes mobiles de tétranyques et a l'avantage d'avoir un délai de récolte d'une journée.

Dans la culture conventionnelle de framboisier, l'application d'un acaricide en post-récolte est une option intéressante pour diminuer la pression des femelles hivernantes au printemps

(Mariethoz *et al.* 1994). Par contre, dans la culture du framboisier remontant sous tunnels l'utilisation des acaricides Agri-Mek (abamectin) et Nexter (pyridaben) homologués en post-récolte ne peuvent être utilisés à cet effet car les femelles débutent leur entrée en diapause avant la fin des récoltes.

Le développement rapide de résistance aux pesticides chez les tétranyques a motivé le développement de méthodes alternatives. Au début des années 1960, l'acarien phytoséiide *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot a été identifié comme prédateur de tétranyques (van Lenteren et Woets 1988). Commercialisé et largement utilisé à travers le monde, il est considéré comme l'agent de lutte biologique le plus efficace dans les cultures en serre de manière générale. Comme les conditions ne lui sont pas toujours favorables, d'autres espèces de phytoséiides sont disponibles commercialement, entre autres *N. californicus* McGregor et *N. fallacis*. Ces trois espèces seront décrites plus en détail dans les prochaines sections. Le succès des acariens prédateurs comme agents de lutte est dû à la forte capacité d'accroissement de leur population plutôt qu'au taux de prédation par individu (Sabelis 1985).

Bien que les acariens phytoséiides soient considérés comme le plus important facteur de régulation des populations de tétranyques dans plusieurs cultures (Croft et Brown 1975; Jeppson *et al.* 1975; McMurtry et Croft 1997), d'autres prédateurs sont également disponibles commercialement et peuvent être intégrés à la stratégie de lutte contre les tétranyques. Au Québec, une petite coccinelle noire, *Stethorus punctillum* Weise (Coleoptera: Coccinellidae), est présente naturellement dans les cultures de framboise (Roy *et al.* 1999). Bounfour et Tanigoshi (2002) suggèrent une efficacité plus élevée de *S. punctillum* au printemps dans les framboisières de l'état de Washington (É-U), lorsque la faible humidité nuit à l'établissement de *N. fallacis*. Malheureusement, les températures fraîches du printemps et les conditions chaudes de l'été québécois ne sont pas optimales au développement de cette coccinelle et son arrivée dans les framboisières québécoises n'est pas bien synchronisée avec celle de sa proie (Roy *et al.* 2002, 2003a). Également, le taux d'accroissement naturel de la population de *S. punctillum*, inférieur à celui de *T. mcdanieli* sous-entend l'incapacité de ce prédateur à contrôler seul les populations de tétranyques sur

une longue période (Roy *et al.* 2003a). Par contre, sa forte voracité estimée à 75 œufs de tétranyques consommés par femelle par jour (Roy *et al.* 2003a) démontre le potentiel de la coccinelle à maîtriser des foyers de tétranyques en combinaison avec d'autres prédateurs acariphages (i.e. phytoséiides).

La cécidomyie, *Feltiella acarisuga* Vallot (Diptera: Cecidomyiidae), est également présente naturellement dans les framboisières québécoises (É. Lemaire obs. pers.). En Belgique, celle-ci fait partie des stratégies d'introduction dans les petits fruits (Bylemans *et al.* 2003). L'adulte *F. acarisuga* a l'avantage de pouvoir repérer les colonies de tétranyques en vol pour y pondre ses œufs. Les adultes se nourrissent de miellat tandis que les quatre stades larvaires se nourrissent de tétranyques. L'environnement optimal pour la larve se situe entre 15 et 27°C et entre 60 et 95 % d'humidité relative (Gillespie *et al.* 2000). Sous des conditions optimales, *F. acarisuga* montre un taux de prédation plus élevé que les acariens prédateurs (Opit *et al.* 1997). Malgré ses nombreuses qualités de prédateur, il est généralement recommandé d'introduire *Feltiella acarisuga* en combinaison avec des prédateurs phytoséiides (Malais et Ravensberg 2008).

1.3 Les acariens phytoséiides acariphages

1.3.1 Description

De nombreuses études ont mis en évidence une diversité de prédateurs de tétranyques, mais l'emphase a surtout été portée sur les acariens phytoséiides. Les premières publications faisant mention du rôle potentiel des phytoséiides comme prédateurs d'acariens phytophages remontent à 1906 (Jeppson *et al.* 1975). Les phytoséiides appartiennent à la classe des Arachnides, à l'Ordre des Parasitifformes, au sous-ordre des Mésostigmates et à la famille des Phytoseiidae. Plus de 1 600 espèces associées à 70 genres auraient été identifiées à travers le monde (Zhang 2003). Ces espèces ne sont pas toutes exclusivement prédatrices de tétranyques. Aussi, la diète de certaines se compose principalement de pollen (McMurtry et Croft 1997). Smith et Newsom (1970) ont énuméré des critères auxquels une espèce de phytoséiides doit répondre pour être considérée comme un prédateur efficace

dans le contrôle du genre *Tetranychus* : 1) consommer tous les stades de la proie; 2) être plus mobile que sa proie; 3) avoir la capacité de se déplacer dans les toiles de sa proie; 4) avoir un potentiel de reproduction élevé; 5) démontrer un faible ou aucun taux de cannibalisme; et 6) avoir une plus grande longévité que sa proie. De plus, selon van Lenteren et Woets (1988), le phytoséiide doit être adapté aux conditions environnementales où se développe sa proie.

Environ 20 espèces de phytoséiides sont disponibles commercialement auprès d'une cinquantaine de distributeurs d'agents de lutte biologique à travers le monde (Gerson et Weintraub 2007). En 2008, trois espèces prédatrices de tétranyques étaient disponibles au Québec : *P. persimilis*, *N. californicus* et *N. fallacis*.

Phytoseiulus persimilis Athias-Henriot fut observé pour la première fois en 1957 dans une production serricole de roses en Algérie (Zhang 2003). Son premier succès comme agent de lutte aurait eu lieu en Allemagne lorsqu'il a été introduit par erreur sur des racines d'orchidées provenant du Chili. Il fut depuis introduit dans plusieurs pays et est utilisé à travers le monde comme prédateur de tétranyques dans les cultures fruitières, maraîchères et ornementales (Zang 2003).

Neoseiulus californicus McGregor, aussi connu sous le nom d'*Amblyseius californicus*, a été décrit pour la première fois en Californie. Cette espèce est originaire de l'Amérique Centrale, de l'Amérique du Sud et de l'Europe méridionale, tandis qu'il a été introduit ailleurs en Europe, en Asie et en Afrique dans un objectif de lutte biologique (Zhang 2003).

Neoseiulus fallacis Garman a été décrit pour la première fois en 1948 sous le nom d'*Iphidulus fallacis* Garman (Chant et Hansell 1971). Il est de nos jours encore bien connu sous le nom d'*Amblyseius fallacis*. C'est un prédateur associé aux régions de climat tempéré-humide de l'Amérique du Nord. Il a été identifié comme un facteur de régulation important des populations d'acariens ravageurs dans les cultures de pommes, fraises, framboises, menthe, houblon, maïs, sorgho et soya (McMurtry et Croft 1997).

Les acariens prédateurs possèdent de plus longues pattes que leurs proies et sont beaucoup plus mobiles. Ces trois espèces ont initialement une forme ovoïde qui devient piriforme chez les femelles gravides (Zhang 2003). *Phytoseiulus persimilis* est d'une couleur rouge orangé et possède de longues soies dorsales qui permettent de rapidement l'identifier sous binoculaire. *Neoseiulus fallacis* et *N. californicus* sont jaune clair et marqués d'un X orangé lorsqu'ils sont bien alimentés. Après quelques jours de jeûne, cette marque disparaît. Ces deux espèces peuvent donc difficilement être différenciées sous binoculaire et de plus être confondues avec d'autres espèces indigènes présentes dans les systèmes. Lorsqu'elles sont observées au microscope, elles peuvent être différenciées morphologiquement. Certains auteurs considèrent la forme de la spermathèque comme critère d'identification (Zhang 2003). Toutefois, la longueur des soies caractéristique à l'espèce semble un critère d'identification plus fiable (Chant 1959; Chant et Hansell 1971; Croft *et al.* 1999). La terminologie utilisée pour identifier les soies diffère d'un auteur à l'autre. Conformément à celle utilisée par Chant et Hansell (1971), chez *N. fallacis*, les soies formant l'hexagone central du bouclier dorsal, soit les j4, j5, z5 et j6, sont plus longues ou égales à la distance entre leurs points d'insertion, contrairement à *N. californicus*. Également, chez *N. fallacis* la soie J2 s'étend sur au-moins le deux tiers de la distance qui sépare son insertion et celle de la soie Z4, tandis que chez *N. californicus* elle s'étend sur moins de la moitié de la distance.

1.3.2 Cycle de vie

Tout comme les tétranyques, le cycle vital des phytoséiides comprend cinq stades : l'œuf, la larve, la protonymphe, la deutonymphe et l'adulte. Par contre, il n'y a pas de période de quiescence qui précède les mues (Laing 1968). Contrairement à *N. californicus* et *P. persimilis*, les femelles fécondées de l'espèce *N. fallacis* ont la capacité d'hiverner sous les conditions climatiques du Québec. Tout comme les tétranyques, elles reprennent leur activité au printemps lorsque la photopériode augmente et que la température s'élève au-dessus de 12°C. Les prédateurs commandés auprès des distributeurs d'agents de lutte sont introduits au stade deutonymphe ou adulte.

Les acariens étant des organismes poïkilothermes, la conversion de la nourriture et la croissance dépendent de la température environnante, ce qui implique que le temps de développement varie (Sabelis 1985). À température optimale, les trois prédateurs se développent plus rapidement que leur proie (Sabelis 1985), ce qui est un critère recherché chez un prédateur. Le développement du stade œuf au stade adulte, sous température constante, est d'environ 4 jours pour *N. californicus* à 35°C (Gotoh *et al.* 2004) et pour *P. persimilis* (Sabelis 1981) et *N. fallacis* (Genini *et al.* 1991) à 30°C.

Les œufs de phytoséïdes sont faciles à distinguer de ceux de leur proie, car ils sont ovales et environ deux fois plus gros, soit environ 0,3 mm de long. Les femelles les déposent individuellement à l'extrémité de poils foliaires, dans les toiles produites par les tétranyques ou en bordure d'une nervure. Les œufs fraîchement pondus sont translucides et incolores, mais ils prennent rapidement une teinte jaune ou orange avant d'éclore (Sabelis 1985). Les larves hexapodes de *N. fallacis* sont les plus actives et ont un taux de prédation plus élevé que celles de *N. californicus*, tandis que les larves de *P. persimilis* sont peu mobiles et ne se nourrissent pas (Monetti et Croft 1997; Kazak 2008). La mobilité des prédateurs augmente lorsqu'ils muent au stade protonympe et acquièrent de leur quatrième paire de pattes. Au stade adulte, les trois espèces mesureront 0,5 mm de long. Outre la grosseur et la couleur rouge-orangé plus vive chez les adultes *P. persimilis*, il n'y a pas de différences caractéristiques entre les individus des stades nymphaux et ceux du stade adulte.

Les phytoséïdes mâles, bien que légèrement plus petits que les femelles, sont difficiles à distinguer, car leur corps est d'une forme similaire à celui des femelles. L'accouplement peut avoir lieu immédiatement après la dernière mue de la femelle (Schulten 1985b). Le mode de reproduction chez ces phytoséïdes est pseudo-arrhénotoque, c'est-à-dire que les mâles haploïdes se développent à partir d'œufs fécondés ayant perdu un jeu de chromosomes (Schulten 1985a). Le nombre d'œufs pondus et le sexe ratio est intimement liés à la densité de proie, particulièrement pour *P. persimilis*. En surabondance de proies, une femelle peut pondre jusqu'à 80 œufs avec un sexe ratio de 5 femelles pour 1 mâle. La valeur de ces paramètres est le double de ce qui a été observé chez *N. californicus* sous les

mêmes conditions (Friese et Gilstrap 1982). Vers la fin août, la diminution de la photopériode stimulera l'entrée en diapause de *N. fallacis* tandis que *N. californicus* et *P. persimilis* demeureront actifs dans la culture tant que la température le permettra.

1.3.3 Activité prédatrice

McMurtry et Croft (1997) ont classé les phytoséiides en quatre catégories selon leurs habitudes alimentaires. La spécialisation alimentaire est un des plus importants critères à considérer dans la sélection d'agents de lutte biologique. Le type I est représenté seulement par des prédateurs du genre *Phytoseiulus* spécialistes du genre *Tetranychus* (McMurtry et Croft 1997). Les prédateurs de ce type ont comme caractéristique physique, de longues soies dorsales qui facilitent leur déplacement dans les toiles au centre des colonies de tétranyques (Sabelis et Bakker 1992). Le développement des prédateurs de ce type est généralement inhibé ou ralenti lorsqu'ils se nourrissent d'une proie appartenant à un autre genre que *Tetranychus* (Rasmy *et al.* 1991). Contrairement aux prédateurs généralistes, avec sa diète exclusive, *Phytoseiulus persimilis* va exploiter au maximum une colonie de tétranyques. Son agrégation est densité-dépendante : le temps passé dans une colonie augmente avec l'augmentation de la densité de proies (Zhang et Sanderson 1997).

Dans les grosses colonies, une femelle *P. persimilis* adulte semble pouvoir déterminer à quel moment quitter une colonie pour qu'il reste suffisamment de proies pour que sa progéniture (œufs pondus) atteigne l'âge adulte (Vanas *et al.* 2006). Lorsqu'il décide de quitter un site, le prédateur peut, en marchant, suivre la trace olfactive laissée par sa proie sur le feuillage (Yano et Osakabe 2009). Ces traces peuvent le mener à une nouvelle colonie, mais lorsque le prédateur ne perçoit plus les composés volatils lui indiquant la présence de tétranyques à proximité, celui-ci peut décider d'émigrer en se laissant porter passivement par les courants d'air à la recherche de nouvelles colonies (Sabelis et Afman 1994).

Le prédateur *P. persimilis* est aveugle. En laboratoire, il semble avoir la capacité de détecter à distance les composés volatils produits par les plantes infestées et d'orienter ses recherches (Janssen 1999). En milieu naturel, cette capacité de recherche ne semble pas lui

permettre de repérer efficacement des colonies éloignées (Yano et Osakabe 2009). Son incapacité à se reproduire sur une diète alternative aux tétranyques l'incite à se disperser (Sabelis et Afman 1994) ou à pratiquer le cannibalisme (Schausberger et Croft 2000), lorsque sa proie n'est plus disponible. Si une réinfestation de tétranyques survient dans la culture, ce prédateur devra être introduit de nouveau (Overmeer 1985a, b; Schausberger et Walzer 2001).

Selon McMurty et Croft (1997), *N. fallacis* est un phytoséiide de type II, soit un prédateur sélectif de tétranyques, qui peut se reproduire sur une plus grande variété de proies de la famille des Tetranychidae. La consommation de proies du genre *Tetranychus* n'est pas essentielle à son développement. Il peut se reproduire sur une diète composée d'autres arthropodes (aleurodes, thrips, ériophyides) ou de pollen, mais à un taux nettement inférieur à celui atteint sur une diète de tétranyques du genre *Tetranychus* (Pratt *et al.* 1999). Ses habitudes alimentaires le situent à une position intermédiaire entre *P. persimilis* et *N. californicus* au niveau de la spécialisation (Croft *et al.* 1998). *Neoseiulus fallacis* a un effet localisé très important. Il mène pratiquement à extinction les colonies de tétranyques avant de se disperser, ce qui peut potentiellement nuire à sa descendance (Jung et Croft 2001). Bien qu'il se disperse rapidement et sur de longues distances lorsque la densité de *T. urticae* est faible (Pratt *et al.* 1998), la fréquence de dispersion par voie aérienne des femelles *N. fallacis* n'est pas fonction de la durée du jeûne comme c'est le cas pour *P. persimilis* (Jung et Croft 2001). En plus de son habitude d'agrégation, *N. fallacis* possède la capacité de se déplacer rapidement entre les plants sur de longues distances, ce qui est une caractéristique de prédateur spécialiste d'espèces agrégatives comme *T. urticae* (Pratt *et al.* 1998).

Contrairement à *P. persimilis*, McMurty et Croft (1997) ont classé *N. californicus* comme un prédateur de type II, mais ses caractéristiques le situent plutôt dans une position intermédiaire entre le type II et III (Croft *et al.* 1998). Il a des soies plus courtes que les deux autres espèces décrites précédemment, ce qui peut faire de lui un prédateur moins efficace à se déplacer dans les toiles au centre des colonies de tétranyques (Sabelis et Bakker 1992). Il est plus fréquemment observé en pourtour des colonies (Schausberger et

Walzer 2001). De plus, *N. californicus* possède des habitudes de dispersion, qui se rapprochent de celles des prédateurs généralistes de tétranyques. Il ne s'attardera pas aussi longtemps dans une colonie de tétranyques que *P. persimilis* et *N. fallacis* (Jung et Croft 2001). Il possède une bonne capacité de dispersion sur un plant et entre les plants, lorsque ceux-ci se touchent. Suite à une introduction, *N. californicus* devrait donc se retrouver plus rapidement dans l'ensemble des foyers de tétranyques (Pratt *et al.* 1999; Walzer *et al.* 2009). Par contre, sa forte capacité à se reproduire en se nourrissant d'insectes (thrips) et de pollen (Croft *et al.* 1998), peut entraîner du mutualisme apparent positif pour les tétranyques. Malgré ses aptitudes à se déplacer entre les plants, le prédateur peut limiter ses déplacements à un même plant si une source de nourriture alternative est présente (Pratt *et al.* 1998). Cette polyphagie a tout de même l'avantage, qu'une fois bien établi, *N. californicus* demeure dans la culture et n'a pas besoin d'être introduit de nouveau si une nouvelle infestation de tétranyques survient. *Neoseiulus californicus* peut également survivre plus longtemps en l'absence de proies que *P. persimilis* (De Courcy Williams *et al.* 2004).

Ces trois prédateurs ont des habitudes de consommations et de déplacements différentes, ce qui affecte la prédation et la répartition des tétranyques dans la culture. Leurs habitudes peuvent être modifiées en présence d'une autre espèce de prédateurs. Les lâchers mono spécifiques ou combinés ont été largement étudiés pour *N. californicus* et *P. persimilis* (Schausberger et Walzer 2001; Rhodes et Liburd 2006; Rhodes *et al.* 2006; Cakmak *et al.* 2009), mais moins fréquemment pour *N. fallacis*, afin de déterminer s'il est possible de tirer profit de leur complémentarité ou si la compétition entre espèces diminue la prédation sur les tétranyques.

La présence de *P. persimilis* diminue l'agrégation de *N. californicus*. À faible densité de prédateurs, les deux espèces limitent leur cohabitation sur une même feuille, mais ce comportement s'estompe lorsque leur nombre augmente. Walzer *et al.* (2009) avance trois explications à cette modification de distribution : 1) le spécialiste *P. persimilis* détecte et colonise plus rapidement les colonies de tétranyques que *N. californicus*; 2) *N. californicus* est un compétiteur inférieur pour sa source de nourriture; et 3) *P. persimilis* évite les

colonies où le prédateur intragilde (IG) supérieur *N. californicus* est présent. Lorsqu'il en a la possibilité, *P. persimilis* choisit de pondre dans des colonies de tétranyques où *N. californicus* n'est pas présent, ce qui n'est pas réciproque. La détection de la présence du prédateur généraliste ne semble possible que sur une très courte distance, car à plus grande échelle *P. persimilis* ne semble pas détecter la présence de *N. californicus* (Cakmak *et al.* 2006). L'augmentation du nombre de prédateurs diminue la possibilité de ségrégation des deux espèces sur une plante. Lorsque la densité de tétranyques est importante et que les deux espèces de prédateurs se retrouvent sur les mêmes feuilles *P. persimilis* est probablement plus affecté par la compétition intraspécifique que par la prédation intragilde puisque les deux espèces ne préfèrent pas le même microhabitat et le même stade de proie (Schausberger et Walzer 2001). *Phytoseiulus persimilis* se nourrira préférentiellement de tétranyques, mais pourra, au hasard, manger des juvéniles de sa propre espèce ou du prédateur généraliste, car il ne semble pas faire la distinction. À l'inverse, les femelles adultes de *N. californicus* semblent reconnaître les larves de *P. persimilis* qu'elles acceptent comme proie, alors qu'elles évitent clairement de consommer les larves de leur propre espèce (Walzer et Schausberger 1999). La prédation hétérospécifique de *N. californicus* sur *P. persimilis* peut nuire à l'établissement du prédateur spécialiste (Schausberger et Walzer 2001).

D'après la littérature consultée, aucune étude n'a encore évalué l'efficacité de lâcher combinés de *N. fallacis* avec *P. persimilis* ou *N. californicus*. Les traits biologiques des deux espèces de *Neoseiulus* ont par contre été comparés. *Neoseiulus fallacis*, tout comme *N. californicus*, semble faire la distinction entre les œufs hétérospécifiques et conspécifiques et lorsqu'il en a le choix, il évite de consommer les œufs de son espèce (Schausberger et Croft 1999). Les habitudes de dispersion de *N. fallacis* le rapprochent des spécialistes. Il demeure plus longtemps dans les foyers, se déplace à une vitesse de marche plus élevée et utilise un comportement de recherche circulaire (Jung et Croft 2001). De plus, il possède une bonne dispersion entre les plants et on peut l'observer au centre des colonies (soies dorsales plus longues). Ces faits laissent croire que la compétition interspécifique peut être plus importante entre *P. persimilis* et *N. fallacis*, qu'entre le

premier et *N. californicus*, car ils partagent le même microhabitat (Sabelis et Bakker 1992) et ont une préférence pour le même type de proies (Blackwood *et al.* 2001).

1.3.4 Compatibilité avec les pesticides

L'utilisation des pesticides, que ce soit pour lutter contre un ravageur une maladie, peut entraîner une explosion des populations de tétranyques. Cette résurgence peut être engendrée par le développement de résistance chez le ravageur ou par élimination de ses ennemis naturels (Hajek 2004b, Shanks *et al.* 1992). Plusieurs matières actives d'insecticides et d'acaricides utilisées dans les productions fruitières sont modérément à hautement toxiques pour les acariens prédateurs, mais heureusement des matières actives à faible impact ont été développées au cours des dernières années (Johnson 2009). Alors que les cultures ornementales et certaines cultures fruitières, par exemple celle de la pomme et de la fraise, jouissent d'une diversité de matières actives disponibles, la culture de la framboise est perçue comme une culture mineure à travers le monde et n'a pas la cote auprès des compagnies qui développent les pesticides (Gordon *et al.* 1990). Comme mentionné précédemment, il en résulte donc un nombre restreint de produits phytosanitaires homologués pour la culture de la framboise. À l'heure actuelle, les acaricides Apollo (clofentezine) et Acramite (bifenazate) conviennent à une gestion intégrée des tétranyques dans la culture de framboisier remontant sous tunnels au Canada. Outre les traitements acaricides, des traitements insecticides peuvent être nécessaires pour lutter contre d'autres ravageurs tels que l'altise à tête rouge (*Systema frontalis* F.), l'altise européenne (*Chaetonecma concinna* Marsham), l'anthonome de la fleur du fraisier (*Anthonomus signatus* Say.), le bytury des framboises (*Byturus unicolor* Say), la punaise terne (*Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois) et plusieurs espèces de pucerons et de lépidoptères (CRAAQ 2010). Les insecticides à base d'imidacloprid, de malathion, d'azinphos-méthyl, de diazinon, de carbaryl et de *Bacillus thuringiensis* Berliner var. Kurstaki doivent être utilisés avec précaution car ils sont faiblement à hautement toxiques pour les acariens prédateurs. L'utilisation de certains fongicides (chaux soufrée, fénhexamide, et même herbicides (paraquat, napropamide) peut également réduire la

population d'acariens prédateurs. *Neoseiulus californicus* et *N. fallacis* semblent avoir développé une résistance à certains pesticides (Croft et Brown 1975; Johnson 2009).

1.3.5 La lutte biologique contre les tétranyques dans les petits fruits

Les publications traitant de la lutte contre les tétranyques sont extrêmement nombreuses et diversifiées. Toutefois, très peu d'entre elles font état d'essais de lutte biologique augmentative dans les framboisières, ainsi que dans les cultures sous grands tunnels. La grande majorité rapporte des résultats obtenus dans les productions de fraises. Les études appliquées visent principalement à comparer l'efficacité et à évaluer la complémentarité de différentes espèces d'acariens prédateurs entre elles ou avec les traitements acaricides, à évaluer l'importance d'un taux et d'un moment de lâcher adéquat ou le ratio prédateur : proie à respecter. Les limites à la réussite de la lutte biologique augmentative sont nombreuses (Collier et Van Steenwyk 2004), ce qui rend parfois les résultats insatisfaisants ou contradictoires.

En Colombie-Britannique, Wood *et al.* (1994) ont évalué l'efficacité du prédateur *P. persimilis* introduit dans une framboisière selon trois ratios prédateurs : proies (1 :50, 1 :100, 1 : 200) lorsque la densité moyenne de ravageurs était de 0,7 *T. urticae* par foliole. Les résultats montrent que ce prédateur non indigène peut s'établir et survivre dans cette région pendant la saison estivale. Bien que les résultats indiquent l'efficacité de *P. persimilis* introduit selon un ratio de 1 : 50 et 1 : 100, la faible densité maximale de 7 tétranyques par foliole pour le traitement témoin semble indiquer que les conditions qui prévalaient étaient peu favorables au développement des tétranyques.

Dans une framboisière (cv Autumn Bliss) en Suisse où le prédateur indigène *Amblyseius andersoni* Chant est présent, deux introductions de *P. persimilis* à un taux de lâcher de 10 prédateurs/m² ont maintenu *T. urticae* à une densité inférieure à 12,9 formes mobiles par foliole (Linder *et al.* 2003). Afin d'améliorer les conditions d'humidité et de température pour *P. persimilis*, l'ajout d'une brumisation a été étudié, mais l'étude n'a pas démontré les résultats escomptés, soit une augmentation de l'efficacité du prédateur.

En Belgique, une étude réalisée dans une framboisière (cv. Autumn Bliss) sous tunnels, a démontré que cinq introductions du prédateur *Neoseiulus californicus* au taux de 2 prédateurs/m² étaient suffisantes pour maintenir les populations de *T. urticae* à une densité acceptable, soit 15 individus ou moins par feuille et un ratio prédateur : proie demeurant supérieur à 1 : 20. Au-delà de ce ratio, l'introduction de l'acarien prédateur *P. persimilis* ou de la cécidomyie *F. acarisuga* est une aide essentielle (Bylemans *et al.* 2003).

Suite à des essais réalisés en serres et en champs, Fraulo et Liburd (2007) estiment qu'un seul lâcher à un taux de 1-2 *N. californicus*/m² dans les fraisières de Floride est suffisant pour limiter l'accroissement de la densité de tétranyques jusqu'à la fin de la saison. Selon ces auteurs, le moment du lâcher est un facteur de seconde importance. Le respect d'un ratio d'introduction prédateur : proie situé entre 1 : 5 et 1 : 10 serait la clé de la réussite à la condition que la densité de tétranyques soit inférieure au seuil d'intervention. L'importance d'un ratio d'introduction inférieur à 1 : 10 pour *N. californicus* a également été démontrée par Greco *et al.* (2005) en Argentine. Par contre, même un ratio d'introduction de 1 : 5 lorsque la densité de tétranyques est de 20 formes mobiles par foliole échoue à maintenir la densité de tétranyques en dessous du seuil de 50 formes mobiles par foliole. L'utilisation d'un ratio d'introduction d'environ 1 : 10 pour *N. californicus*, *P. persimilis* et la combinaison des deux prédateurs ont permis de significativement diminuer les populations de tétranyques comparativement au traitement témoin (Rhodes *et al.* 2006). L'espèce *N. californicus* introduite seule aurait permis la répression la plus hâtive, tandis que la diminution de la population de tétranyques serait survenue le plus tardivement avec l'introduction combinée. Ces résultats contrastent avec ceux obtenus par Cakmak *et al.* (2009) dans une fraisière sous tunnels de Turquie. Dans cette dernière étude, l'introduction du prédateur *N. californicus* selon un ratio de 1 : 20 n'a pas suffi à maintenir la population de *T. cinnabarinus* en dessous du seuil de dommages économiques.

Alors que les auteurs abordent fréquemment les thèmes de contaminations entre les traitements, habitudes alimentaires des prédateurs et interactions entre différentes espèces dans l'interprétation de leurs résultats de recherche, ils présentent et discutent plus rarement

de données climatiques (e.g., température et humidité), et ce, malgré le rôle essentiel qu'elles jouent dans la réussite de la lutte biologique.

1.3.6 Influence de la température et de l'humidité sur les fonctions biologiques des prédateurs

Bien qu'un prédateur possède tous les attributs pour réprimer sa proie, une mauvaise adaptation aux conditions climatiques peut se traduire par un échec de la lutte biologique contre le ravageur ciblé. L'utilisation combinée d'espèces de prédateurs, dont la réponse aux conditions climatiques diffère, peut augmenter les chances de réussite de la stratégie de lutte biologique (Strong et Croft 1995).

Pour que la lutte biologique soit efficace, il est préférable que la durée du cycle de développement d'un acarien prédateur soit plus courte que celle de sa proie (Vanas *et al.* 2006). Bien que la durée de développement dépende de nombreux facteurs (e.g. la lignée de l'acarien, l'espèce végétale hôte et son cultivar, la source de nourriture), la température est considérée comme étant le plus important facteur abiotique, suivi de l'humidité (Sabelis 1981). Par ailleurs, la méthodologie utilisée pour caractériser la dépendance thermique et hygrométrique du développement d'un arthropode peut influencer les résultats (Vanas *et al.* 2006). Ainsi, il faut être prudent lorsqu'on doit comparer la réponse thermique de prédateurs et de leurs proies obtenue d'études différentes.

Phytoseiulus persimilis a une température minimale de développement estimée à 11,2°C (Sabelis 1981). Son cycle de développement s'accélère jusqu'à 30°C, mais, au-dessus de cette température, une forte mortalité est observée pour tous les stades (Sabelis 1981). Pour *N. fallacis*, le seuil de développement est de 10,1°C pour les œufs et de 11,8°C pour les formes mobiles (Genini *et al.* 1991) et son cycle de développement s'accélère jusqu'à 32°C (Smith et Newsom 1970). Quant à *N. californicus*, la température seuil de développement est estimée à 11,7°C pour le stade œuf et son taux de développement augmente jusqu'à 30°C alors qu'à 35°C il est équivalent à celui observé à 25°C mais le taux de mortalité est plus élevé. À partir de 37,5°C, aucun œuf de *N. californicus* n'écloît (Gotoh *et al.* 2004).

Une température élevée combinée à un faible pourcentage d'humidité relative (HR) peut interrompre le cycle de développement des phytoséiïdes. L'œuf est le stade le plus sensible à l'humidité, car les formes mobiles peuvent se déplacer vers un endroit plus humide et obtenir de l'eau par la consommation de proies (Gaede 1992; Monetti et Croft 1997; De Courcy Williams *et al.* 2004). Pour *P. persimilis*, la proportion d'œufs qui éclot diminue lorsque la température augmente de 20 à 30°C et que l'humidité relative diminue sous 70 % (Sabelis 1981). De Courcy Williams *et al.* (2004) ont observé 50% de mortalité des œufs de *P. persimilis* sous des conditions de 20 °C et 70% HR. Toutefois, ces résultats diffèrent ceux de Stenseth (1979) qui démontrent qu'à 21°C et 40% HR 84,5% des œufs éclosent, contrairement à 7,5% à 27°C et 40% HR. La réponse des prédateurs aux conditions climatiques peut varier selon le substrat utilisé pour l'expérience (Everson 1980; Sabelis 1981) et la provenance des prédateurs (Walzer *et al.* 2007). De Courcy Williams *et al.* (2004) ont d'ailleurs observé que 51,9% et 4,9% des œufs de *N. californicus* éclosent à 70% et 60% HR, respectivement, alors que cette espèce est reconnue par plusieurs pour tolérer des taux d'humidité plus faibles que ceux tolérés par *P. persimilis* (Castagnoli et Simoni 1994; Monetti et Croft 1997; Weintraub et Palevsky 2008). Finalement, Croft *et al.* (1993) ont établi que 50% des œufs de *N. fallacis* sont non viables à 70% HR sous une température constante de 20°C et que le taux de survie des jeunes larves était de 3,4 % après deux jours à 20°C et 50% HR. Le niveau de tolérance hygrométrique des prédateurs semble relié à leur origine géographique et au type de plante hôte (Croft *et al.* 1993; Bounfour et Tanigoshi 2002). Alors que *N. fallacis* est associé à un climat tempéré-humide et à des cultures offrant une canopée dense (Nyrop *et al.* 1998), *N. californicus* se retrouve dans des climats plus arides de l'Amérique Centrale, de l'Amérique du Sud et du bassin Méditerranéen (Zhang 2003), ce qui suggère une tolérance à un taux d'humidité plus faible pour *N. californicus*.

La température et l'humidité n'affectent pas seulement le cycle de développement des prédateurs, mais également leur consommation de proies et leur dispersion. À l'aide d'un modèle qu'ils ont développé à partir de données obtenues en laboratoire, Skirvin et Fenlon (2003b) ont estimé qu'à partir de 26°C la consommation d'œufs de *T. urticae* par les

femelles adultes de *P. persimilis* diminuait. Cette diminution du taux de prédation peut être une conséquence de la diminution de sa mobilité et, par le fait même, de ses capacités de recherche à des températures supérieures à 25°C (Skirvin et Fenlon 2003a). Chez *N. californicus*, la dispersion des femelles adultes augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à 35°C et la diminution de l'humidité (Auger *et al.* 1999). Kazak (2008) a également observé une diminution de consommation de larves de *T. cinnabarinus* par les femelles adultes de *P. persimilis* entre 25 et 30°C. Aucune diminution de consommation en fonction de l'augmentation de température n'a été observée chez les protonymphes et les deutonymphes.

Il est important de noter que les études portant sur les arthropodes sont fréquemment réalisées sous des conditions de température et d'humidité constantes. Cependant, selon Kramer et Hain (1989), un taux d'humidité relative fluctuant entre 60 et 95% entraîne moins de mortalité qu'un taux moyen constant. Également, selon Sabelis (1981), le taux de développement de *T. urticae* répondant instantanément à une variation de température, l'effet de cette variation sur la survie n'est pas mis en évidence. La mortalité peut être considérée négligeable à température constante entre 15 et 30°C, mais elle doit être considérée en dehors de cet intervalle. Il importe de souligner à nouveau que les variations journalières de températures et d'humidité rencontrées dans les tunnels de production sont importantes, de l'ordre de 25°C et de 70% HR (É. Lemaire, obs. pers.). Les effets de telles variations de température et d'humidité sur les tétranyques et les phytoséides, n'ont encore jamais été étudiés.

Des températures plus fréquentes dans la zone de confort des tétranyques pourraient avantager ces derniers au détriment des prédateurs phytoséides.

1.4 Dynamique de population des tétranyques sous tunnels; approche de modélisation bioclimatique

La température est un des facteurs abiotiques ayant le plus d'influence sur les processus vitaux des arthropodes (Sabelis 1981). Ainsi, un grand nombre d'études bioclimatiques, expérimentales et théoriques, vise à éclaircir l'influence de ce facteur sur la dynamique des

systèmes tritrophiques : plante hôte, ravageur, prédateur/parasitoïde. Elles proposent une diversité de modèles et d'équations de réponse caractérisant la dépendance thermique de processus tels que le développement, la reproduction, le sexe ratio, l'alimentation, la mobilité et la mortalité. En déterminant les seuils thermiques et les taux propres à un individu, ces outils permettent, entre autres, de mesurer la synchronisation des prédateurs avec leurs proies et leur performance en fonction de la température ambiante ou de mieux cibler les interventions phytosanitaires en fonction du climat (Sabelis 1981; Kidd et Jervis 2005; Bourgeois 2009). Différentes approches de modélisation ont été développées et peuvent être employées selon l'objectif visé et les connaissances disponibles. Le terme « modèle » est donc utilisé de différentes façons. Dans le cas présent, nous parlerons de modèles de régression linéaire et non linéaire, soit des fonctions de réponses, qui sont les composantes d'un modèle de simulation dynamique, qui constitue un modèle mathématique conceptualisé pour décrire la dynamique d'un système dans le temps.

1.4.1 Approches de caractérisation de la dépendance thermique des arthropodes et modélisation de dynamique de population

Certaines études se limitent à mesurer, pour une population de ravageurs et/ou d'ennemis naturels, la durée de développement, la fécondité, la mortalité, le sexe ratio et/ou la prédation sous un seul régime constant de température (Amano et Chant 1977; Everson 1980; Friese et Gilstrap 1982). Les données recueillies dans ce type d'études permettent de calculer un paramètre fréquemment utilisé dans la littérature, le taux intrinsèque d'accroissement naturel de la population (r_m) pour le ravageur et/ou son ennemi naturel. Ce paramètre démographique est utile pour prédire le potentiel d'accroissement d'une population dans un environnement donné (Southwood et Henderson 2000; Sabelis 1985). On peut alors parler de modèle de simulation statique (Law 2007). Dans un environnement contrôlé, par exemple sous serres, cette approche est intéressante pour identifier l'agent de lutte le plus prometteur. Toutefois, elle fournit peu d'informations en continu sur la croissance d'une population soumise à des conditions variables.

D'autres études se concentrent sur les réponses thermiques du développement et de la reproduction d'un nombre restreint (3 ou 4) de régimes constants de température situés

entre les températures minimales et optimales (Canlas *et al.* 2006; Kazak 2008; Genini *et al.* 1991). Les données ainsi obtenues permettent de déterminer une relation de dépendance thermique à l'aide de modèle de régression linéaire simple. Cette mesure de réponse a l'avantage d'être rapide, toutefois elle ne permet pas une estimation adéquate des températures cardinales (i.e. températures seuil inférieur, optimal et seuil supérieur) car les réponses thermiques des processus vitaux des arthropodes suivent une courbe en forme de cloche asymétrique et non linéaire (Logan 1988). La méthode de régression linéaire simple peut être une composante adéquate si elle est intégrée à un modèle dont l'objectif est de décrire une population qui évolue dans des conditions de températures sous-optimales. La régression linéaire est d'ailleurs utilisée dans l'approche simple de cumul des degrés-jours. Lorsque de nombreux jeux de données sur le développement d'un arthropode à génération discrète sont disponibles, ce type de modèle peut être développé et utilisé afin d'orienter les efforts de dépistage et cibler le meilleur moment pour les interventions phytosanitaires.

En contrepartie, les études qui s'intéressent aux processus vitaux d'un organisme soumis à des températures sous-optimales et supra-optimales et se situant près des seuils thermiques (inférieur et supérieur), permettent d'identifier l'intervalle de température dans lequel l'organisme est actif. De nombreuses équations non-linéaires ont été développées pour décrire la réponse thermique de différents taux (e.g. développement, ponte, mortalité) régissant la dynamique prédateur : proie (Logan *et al.* 1976; Lactin *et al.* 1995; Duthie 1997; Briere *et al.* 1999). Ces équations ont déjà servi à estimer des courbes de réponse pour différents arthropodes (Roy *et al.* 2002; Kim et Lee 2003; Kim *et al.* 2009a; Kim *et al.* 2009b; Jandricic *et al.* 2010). Ce type d'équation est essentiel pour modéliser les populations dans un environnement de températures extrêmes et fluctuantes comparables à celles observées sous tunnels.

Les modèles de simulation dynamique permettent de reproduire dans le temps les détails de la dynamique de population d'un système particulier (e.g. dynamique prédateurs : proies) (Kidd et Jervis 2005) par la combinaison de différentes fonctions de réponse et processus physiologiques. Ils permettent d'évaluer l'importance de différents paramètres sur la dynamique d'un système biologique complexe et d'améliorer la compréhension de tels

systèmes (Bancroft et Margolies 1999; Sabelis 1981; Shipp et Clarke 2002). Les méthodologies utilisées sont aussi complexes et diversifiées que les paramètres qui régissent de tels systèmes (Kidd et Jervis 2005). Des modèles de populations ont déjà été présentés, par exemple, pour *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera : Carosinidae) (Kim et Lee 2010) et *T. urticae* et *P. persimilis* (Sabelis 1981; Bancroft et Margolies 1999).

L'approche par simulation dynamique est la plus adéquate pour modéliser la dynamique de population des tétranyques dans les framboisières sous tunnels. Le cycle de développement rapide des acariens, les générations chevauchantes, les températures fluctuantes, la probabilité élevée d'être en zone thermique supra-optimale, et la disponibilité restreinte de données de terrain ne permettent pas d'utiliser l'approche simple de cumuls thermiques, comme les degrés-jours, pour modéliser un tel système.

De plus, le développement d'un modèle simulant la dynamique des tétranyques sous tunnel permettra une meilleure compréhension de ce système encore méconnu et de ses composantes, et l'évaluation de différentes stratégies d'introduction de prédateurs. La paramétrisation de ce modèle permettra d'orienter les recherches supplémentaires requises pour développer une stratégie phytosanitaire efficace dans la culture du framboisier remontant sous tunnels.

La section suivante présente les fonctions retenues pour construire le modèle de simulation dynamique du système tétranyques en framboisières sous tunnels.

1.4.2 Fonctions de réponse des acariens

Roy *et al.* (2002) ont évalué la précision avec laquelle 11 différents modèles estimaient la réponse thermique du taux de développement de *T. mcdanieli* en comparaison de données mesurées sous 12 régimes de températures constantes. Dans cette étude, l'équation II de Lactin permet d'obtenir la meilleure estimation des températures seuils de développement pour *T. mcdanieli* (Roy *et al.* 2002). Cette équation fut également employée pour modéliser le développement de tous les stades de *T. urticae* et *P. persimilis* (Bancroft et Margolies 1999).

Outre le taux de développement, la fécondité, la mortalité et le sexe ratio sont aussi d'autres facteurs qui influencent l'accroissement de la population. Sous températures constantes, la fécondité des femelles *T. mcdanieli* est croissante jusqu'à 24°C, mais une exposition à une température plus élevée entraîne une baisse (Roy *et al.* 2003a). Toujours sous températures constantes, la mortalité est négligeable entre 16 et 36°C (Sabelis 1981; Roy *et al.* 2002). Le vieillissement des femelles adultes est un important facteur à considérer puisque la ponte journalière diminue avec l'âge chez les femelles de tétranyques (Janssen et Sabelis 1992), tandis que la mortalité augmente (Sabelis 1981; Roy *et al.* 2003a). Pour *T. mcdanieli* ou *T. urticae*, il n'y a pas d'équations fonctionnelles clairement identifiées pour décrire la réponse de ces paramètres en fonction de la température et de l'âge des individus. Sabelis (1981) a mené une étude complète sur les facteurs régissant les paramètres biologiques qui dictent les interactions entre *T. urticae* et quatre de ses prédateurs (e.g. *P. persimilis*). L'auteur utilise une approche de répartition de la ponte et de la mortalité d'une cohorte de femelles en périodes dont la durée est représentative de la durée de vie maximale des femelles se développant à température constante. Une telle approche semble prometteuse pour remettre à un niveau comparable les données brutes d'oviposition et de mortalité mesurées sous 12 différents régimes de température constante (Roy *et al.* 2003a). Ces taux de mortalité et d'oviposition remis sur la même échelle d'âge relative peuvent être cumulés et leur distribution représentée par deux fonctions sigmoïdales de Weibull (Duthie 1997; Kim et Lee 2003; Kim *et al.* 2009a; Kim *et al.* 2009b; Kim et Lee 2010).

Chez *T. mcdanieli*, le sexe ratio est toujours favorable aux femelles. Toutefois, ce favoritisme est modulé selon un effet quadratique en fonction de la température et de l'âge des femelles (Roy *et al.* 2003b). Le pourcentage de progénitures mâles décroît lorsque la température s'éloigne de 28°C, mais s'accroît en début et fin de vie des femelles (Roy *et al.* 2003b). Le sexe ratio moyen est de 3 femelles pour 1 mâle (Helle et Pijnacker 1985; Roy *et al.* 2003b)

L'ensemble de ces paramètres permettra de créer un modèle de simulation dynamique prédisant l'évolution d'une population donnée en réponse aux contraintes qui leur sont imposées. Dans la présente étude, une température variable et une humidité constante sont

considérées. La modélisation de la dépendance hygrométrique ne sera donc pas traitée davantage dans ce document.

1.5 Hypothèses et Objectifs :

L'objectif principal du projet était d'évaluer l'efficacité des acariens phytoséides *Neoseiulus fallacis*, *N. californicus* et *Phytoseiulus persimilis* à réprimer les tétranyques dans la production de framboisiers remontants sous tunnels et de développer une stratégie d'introduction efficace. L'objectif secondaire était de modéliser la dynamique de population des tétranyques sous le microclimat particulier des tunnels.

Les hypothèses suivantes furent testées :

- 1) Les prédateurs phytoséides permettent une répression des populations de tétranyques équivalente à celle obtenue avec les traitements acaricides;
- 2) Une vaporisation d'eau (i.e. humidification artificielle) optimise le taux d'humidité relative sous tunnels et facilite ainsi l'établissement du prédateur *P. persimilis*.
- 3) Une simulation dynamique simplifiée prédisant l'évolution des populations de tétranyques sous tunnels en réponse à la température peut être développée à partir des données disponibles dans la littérature.

Les hypothèses 1 et 2 furent testées par des essais de terrain réalisés chez l'entreprise Les Fraises de l'Île d'Orléans inc. à St-Laurent de l'Île d'Orléans. L'hypothèse 3 fut testée par paramétrisation d'un modèle bioclimatique à partir des données sur la biologie de *T. mcdanieli*, *N. californicus*, *N. fallacis* et *P. persimilis* disponibles dans la littérature et les températures enregistrées sous tunnels, à l'aide du logiciel de programmation Microsoft Visual Basic.

Chapitre 2:

Efficacy of releases of Phytoseiid Mites (Acari: Phytoseiidae) and a temperature-driven population model of *Tetranychus mcdanieli* (Acari: Tetranychidae) on raspberry in high tunnel production

2.1 Résumé

Des essais en champ furent réalisés dans une production de framboisiers remontants sous tunnels. D'abord, l'efficacité des prédateurs *Neoseiulus fallacis* et *N. californicus* combinés à *Phytoseiulus persimilis* fut comparée à celle d'un traitement acaricide (clofentezine). Les conditions climatiques et les faibles taux de lâcher n'ont pas favorisé l'établissement des prédateurs. Ces derniers se sont avérés moins efficaces que la lutte chimique. Ensuite, l'effet d'une brumisation sur l'établissement de *P. persimilis* fut mesuré. La répression des tétranyques fut plus rapide dans le traitement avec brumisation. Toutefois, les densités de tétranyques et de prédateurs ne différaient pas significativement entre les traitements. Finalement, un modèle de simulation dynamique fut développé et calibré afin de mieux comprendre la dynamique des tétranyques sous le microclimat des tunnels. Le modèle décrit adéquatement l'évolution des populations de tétranyques, permet de mesurer l'importance de différents paramètres sur la dynamique de population et démontre le rôle critique de la température dans la gestion des tétranyques sous tunnels.

2.2 Abstract

Field experiments were conducted to determine the establishment and the effectiveness of some predatory mites to control spider mites in raspberry grown under tunnels. First, the efficacy of *Neoseiulus fallacis* and *N. californicus* releases combined to *Phytoseiulus persimilis* was compared to an acaricide (clofentezine). Climatic conditions and low release rates being unfavourable to predator establishment, releases strategies were not as effective as the acaricide. Second, the effect of adding an artificial mist on the establishment of *P. persimilis* was measured. Faster control was achieved in treatment with artificial mist, but the difference in prey and predator density was not significant. Third, a population dynamics model was developed and calibrated with the aim to better understand the spider mite dynamics evolving under tunnel. The model fits well the field data, is useful to size up the impact of different parameters on the population dynamic and shows that temperature is a critical parameter in the management of spider mites.

2.3 Introduction

In recent years, an increasing number of growers have started high tunnel raspberry production in order to sell fresh market raspberries off season. However, those pioneering growers have been facing some challenges, such as new pest management. In high tunnels, the average, maximum and minimum air temperature can be respectively 3, 8 and 2°C warmer than the outside air temperature (É. Lemaire pers. obs.). Indeed, such difference in temperature not only favors the crop growth but also increases spider mite outbreaks (Jeppson *et al.* 1975; Sabelis 1981).

Very few miticides are currently registered in Canada for raspberries (AAC 2007) while spider mites are known to rapidly evolve resistant strains to most miticides (Zang 2003). Also, the short interval between harvesting and the maximal number of applications allowed per year greatly limit the use of chemical control during the four months of primocane fruiting. In this context, biological control might be advantageous and deserves attention in high tunnel raspberries.

Phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) are important predators of spider mites. Many phytoseiids are capable of suppressing spider mites at low levels on numerous native plants and crops (McMurtry et Croft 1997), including the red raspberry (Wood *et al.* 1994; Bylemans *et al.* 2003; Linder *et al.* 2003). In Quebec, Roy *et al.* (1999) found that the indigenous species *Neoseiulus fallacis* (Garman), a selective-generalist predators of tetranychid mites (McMurtry et Croft 1997), was the most abundant species among the guild of insect and mite predators in commercial red raspberry fields that are managed with pesticides. *Neoseiulus fallacis* naturally occurs in North America temperate-humid region and is often associated with dense vegetative crop (Nyrop *et al.* 1998). Temperature and humidity are important factors regulating the life history of phytoseiids mites (Stenseth 1979; Nyrop *et al.* 1998; DeCoursey Williams *et al.* 2004; Gotoh *et al.* 2004). Croft *et al.* (1993) have found a lethal humidity (LH₅₀) response close to 70% RH for *N. fallacis* eggs at 20°C. The lower development temperature threshold for this species is approx. 10°C for motiles (Genini *et al.* 1991) and its development rate accelerates with temperature up to

32°C (Smith et Newsom 1970). Finally, *N. fallacis* has the advantage to overwinter in Quebec.

Climatic conditions and the response of *N. fallacis* under high tunnels in Quebec being unknown, we undertook a study to evaluate the efficacy of this species and two other commercially available predatory mite species: *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis*. As *N. fallacis*, *N. californicus* is adapted to prey fluctuation by feeding on pollen or other small arthropods (Croft *et al.* 1998) while *P. persimilis* is a specialized predator of *Tetranychus* species. It can suppress spider mite population faster than *N. fallacis* and *N. californicus* under optimal conditions (Schausberger et Walzer 2001; Cakmak *et al.* 2009) but shows a limited tolerance to humidity below 70% R.H. and temperature above 30°C (Sabelis 1981). In contrast, *N. californicus* can develop and reproduce on *T. urticae* diet at temperature up to 35°C (Gotoh *et al.* 2004).

Limits to the success of augmentative biological control are numerous (Collier et Van Steenwyk 2004), and many studies have shown contradictory results. While authors frequently discuss contaminations between treatments, predator : prey ratio and interactions between different species in interpreting their results (e.g. Schausberger et Walzer 2001; Linder *et al.* 2003; Opit *et al.* 2004; Greco *et al.* 2005; Rhodes *et al.* 2006; Fraulo et Liburd 2007; Cakmak *et al.* 2009), they rarely present and discuss climate data (e.g. temperature and humidity), and this, despite the key role of climatic variables in the success or failure of biological control (van Lenteren et Woets 1988).

Prediction of the dynamic of spider mites and phytoseiids under high tunnel microclimate is a challenge. Thus, a dynamic simulation model integrating the temperature factor is an interesting tool to understand population dynamics and to design effective management strategies (Sabelis 1981; Kidd et Jervis 2005; Kim et Lee 2010).

The primary objective of our study was to evaluate the effectiveness of selected phytoseiid species to suppress spider mites and to develop a strategy for effective introductions of phytoseiids in florican-fruited raspberries under high tunnels in Quebec. First, we compared the effectiveness of the native predator *N. fallacis* to those of the introduced

predator *N. californicus* combined with *P. persimilis*. Second, we investigated whether adding an artificial mist increased the efficacy of *P. persimilis* at controlling spider mites. Third, we modelled the population dynamics of spider mites under the particular microclimate of high tunnels with the aim of better understanding the population dynamic of pest and predators under these conditions.

2.4 Materials and methods

2.4.1 Field experiments

Raspberry crop

In 2009, two experiments were conducted in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec, Canada (46°52'0.02"N 71°1'0.02"W), in a raspberry plantation under high polyethylene tunnels at the farm Les Fraises de l'Île d'Orléans Inc. Raspberry canes (cv. "Autumn Britten") were planted in 2007 (experiment 1) and 2008 (experiment 2) in four rows per tunnel on raised beds, mulched with white polyethylene plastic and drip-irrigated.

2.4.1.1 Experiment 1

The first experiment was conducted from May 19 to July 7, 2009. Three treatments were compared: (1) releases of *N. fallacis* and *P. persimilis*, (2) releases of *N. californicus* and *P. persimilis* and (3) application of Apollo® SC. Treatments were replicated five times in a randomized complete block design (15 plots total). Each plot consisted of a 3 m raspberry row covered with a 100-µm mesh aperture Nitex cage (dimensions = 2 m width X 3 m long X 2.7 m high; overall surface = 6 m² area) whose bottom edges were buried in soil to keep both spider mites and predatory mites from dispersing between plots. Each cage comprised nine raspberry plants. Cages were disposed on side rows, within two tunnels, to facilitate ventilation.

Sampling

A non destructive sampling was conducted one week prior to the beginning of the experiment on all raspberry buds in each individual cage to ensure that the naturally-

occurring populations of *T. mcdanieli* and *T. urticae* adult females were similar in number among cages. Whenever needed, spider mite females were removed or released on small leaf discs to reach a density of approx. 30 females per cage. New primocanes were 0-20 cm high and floricanes were at the stage “leaves unfolding” at the time of the set up.

For the following seven weeks, 25 leaflets per cage were randomly collected once a week placed in plastic bags and kept in a cooler before be store at 4°C until counts in up to three days in the laboratory. The number of spider mite and predatory mite motiles and eggs were counted under a stereo microscope. After mite counts were done, the sampled leaflets were returned to their respective cages. When more than two *Neoseiulus spp.* or *Amblyseius sp.* adults were observed in a cage, the individuals were collected with a fine brush, kept in 70% ethanol solution and subsequently mounted in Hoyer’s medium on microscope slides for identification using taxonomic keys (Chant 1959; Chant et Hansell 1971; Jeppson *et al.* 1975; Baker et Tuttle 1994). Identifications were verified by Frederic Beaulieu from the Agriculture and Agri-Food Canada National identification service, Central Experimental Farm, Ottawa and voucher specimens were sent to the Laboratoire de Diagnostic en Phytoprotection of Québec’s Ministry of Agriculture.

Predator releases

Predatory mites were obtained from either Plant Product Co Ltd/Plant-Prod Québec (distributors of Biobest Biological Systems (Westerlo, BE) and Applied Bio-nomics Ltd (North Saanich, BC) or Koppert Biological Systems, inc. Canada (Berkel en Rodenrijs, The Netherlands). Here we list the different release rates per m² (cage area = 6 m²) and dates the releases were done for the three treatments. For treatment (1), releases of *N. fallacis* and *P. persimilis*, four releases of predators were made: 3 *N. fallacis*/m² on May 21, 5 *P. persimilis*/m² on June 17, 10 *P. persimilis*/m² on June 23, and 25 *P. persimilis*/m² on June 30. For Treatment (2), releases of *N. californicus* and *P. persimilis*, four releases of predators were also made: 3 *N. californicus*/m² on May 21, 5 *P. persimilis*/m² on June 17, 5 *N. californicus*/m² and 5 *P. persimilis*/m² on June 23 and 25 *P. persimilis*/m² on June 30. Finally, no phytoseiids were released for treatment (3), application of acaricide. Predators were released within 24 h of their arrival. Using a fine paint brush, individuals were first

transferred from the suppliers bottles to vials (50 ml) filled with vermiculite and counted to obtain the specific introduction rates. After a gentle rotation of the vial, predators and vermiculite were laid on each plant and the container was left at the bottom of the plants. Temperature and relative humidity were recorded every 60 minutes using 12 HOBO Data Loggers (Onset, Bourne, MA) placed in the canopy inside and outside the cages.

Chemical treatment

The third treatment consisted in one application of clofentezine (Apollo® SC Acaricide Ovicide) (Makhteshim Chemical Works Ltd., Raleigh, NC) made using a 8 L solo type sprayer at the rate of 500 ml product per hectare on May 22 2009. The first spider mite larva observed set the signal for acaricide spraying. Apollo® SC was selected because it was the least toxic product registered in Canada at the time of the study for raspberry during the pre-harvest phase (CRAAQ 2010).

2.4.1.2 Experiment 2

The second experiment was conducted from August 10 to October 12, 2009. Three treatments were compared: (1) releases of *N. californicus* and *P. persimilis* with artificial mist, (2) releases of *N. californicus* and *P. persimilis* without artificial mist and (3) control with no releases and no artificial mist. Treatments were replicated five times in a randomized complete block design (15 plots total). Cages used for the first experiment were utilized for this experiment after thoroughly inspecting them for mites to avoid contamination. Cages were moved to a different tunnel complex on the same farm. Motiles (ca. 500 adults and nymphs) were collected from raspberry plants in neighbouring tunnels and released in the lower and middle strata of the caged plants. One week prior to the first predator release, a non destructive sampling was conducted in the cages to ensure a population of ca. 250 motiles spider mites, but eggs and larvae were not counted.

Sampling

The same sampling method as the one described for the first experiment was used. Samples of 20 adults *Neoseiulus sp.* or *Amblyseius sp.* were collected in each plot for species identification.

Predator releases

For the two treatments requiring predator releases [(1) releases of *N. californicus* and *P. persimilis* **with** artificial mist, and (2) releases of *N. californicus* and *P. persimilis* **without** artificial mist], a total of three releases were made: 20 *N. californicus*/m² and 5 *P. persimilis*/m² on August 12, 20 *P. persimilis*/m² on August 18, and 20 *P. persimilis*/m² on August 26. For low introduction rates (less than 20/m²), phytoseiids were counted as described in *Experiment 1*. For high introduction rates (20/m²), the numbers of predatory mites needed per cage was obtained by fractioning the vermiculite volume from purchased bottles filled with 1000 or 2000 predators. The vermiculite containing the predatory mites was then deposited on the foliage in the lower and middle strata of the plants.

Artificial misting

For Treatment (1), artificial misting to increase relative humidity in cages was done with an 8 L solo type sprayer. From August 11 to August 31, water was sprayed on the foliage and the ground from four to six times throughout the day between 10h and 18h. About 2 L was spread per cage each time. Temperature and relative humidity were recorded every 5 minutes with 12 HOBO Data Loggers placed in the canopy inside and outside the cages.

Statistical analysis

Square-root transformation of the dependent variables (i.e. mean density of spider mites and phytoseiids per leaflet) was used to meet the normality and the homogeneity of variance assumptions of ANOVA. A two-way analysis of variance with repeated measures was used in both experiments to study the evolution of mites with date as the repeated factor. The MIXED procedure of SAS was used with a repeated statement and the covariance structure that minimize the Akaike criterion. The method of Kenward-Roger

was used to calculate the degree of freedom. Pairwise comparisons were made using protected Fisher LSD (least significant difference) (SAS Institute Inc. 2009).

2.4.2 Description of the population dynamics model

The population dynamics model, programmed in Microsoft® Visual Basic® 2007, simulates the population growth of spider mites, as a mean density per leaflet, under tunnel microenvironment. We take the view that our model is a useful tool for examining the effects of some critical factor, especially temperature, on spider mites abundance.

The hourly canopy temperature is the only driving variable because temperature is known to be the most important factor regulating the life history of spider mite. The model is updated daily, but is based on cumulative hourly effect because development in spider mites may be considered as reacting instantaneously to changes in temperature (Sabelis 1981).

The spider mite model was constructed to include three developmental stages: immature (i.e. egg laying to teleiochrysalis), female adult and male adult individuals. Simulated spider mites are grouped into separate cohorts of individuals that entered the stage on a given day and are treated as different age groups in that stage. At any given time, each cohort is characterized by two state variables: the normalised age (NA) of the cohort and the number of individuals in the cohort. Simulated processes (developmental rate (DR) or maturation rate (MR), oviposition rate (DO), mortality rate (M), the predation rate (Pr) and constant sex ratio) are applied to different cohort according to the schematic of **Figure 2.1**. The model is deterministic, randomness is not present; individual variation is ignored.

The physiological age of each cohort is modulated by a temperature-dependant immature development rate (DR) or an adult maturation rate (MR), while the number of individuals in immature cohorts is modulated by the oviposition rate (DO) and the predation rate (Pr), and the number of individuals in adult cohorts by the adults mortality rate (M). Rate variables functions are described successively. All estimated values of parameters are shown in **Tableau 2.1**.

The daily output of the population model is the total number of spider mite individuals obtained by summing the mite (all stages) number in each cohort.

The simulation starts with a cohort of immature individuals and a cohort of adult female individuals, according to the initial experimental mite density per leaflet sampling in cages. The physiological age of all individuals is assumed to be zero while the normalised age (NA) of the immature cohort starts at zero and the one of the adult (female and male) cohort starts at one, on a scale of two. Successive cohorts are created by the total number of eggs oviposited on a given day.

2.4.2.1 Physiological age

According to Roy *et al.* (2002), the second non linear equation described by Lactin (1995) and modified from Logan (1976) was used to account for development rate and maturation rate as a function of the ambient temperature (T). The parameters values in the Lactin2 equation,

$$D(T) = e^{(\rho T)} - e^{(\rho T_L - \frac{T_L - T}{\Delta T})} + \lambda \quad (2.1)$$

were estimated by iterative non linear regression (PROC NLIN, SAS Institute Inc. 2009) using the reciprocal of total immature development time (Roy *et al.* 2002) and the reciprocal of total female longevity (Roy *et al.* 2003a), both obtained from experimental data at constant temperature. Where, ρ is a constant defining the rate at optimal temperature, T_L is the lethal maximum temperature, ΔT is the temperature range over which physiological breakdown becomes the overriding influence and λ forces the curve to intercept the x-axis, thus allowing estimation of a low temperature threshold.

The physiological age (P) of individuals in a cohort the n th days after start of the stage was defined as:

$$P_n = \sum_{j=1}^n D_j$$

(2.2)

where D_j is the total development or maturation rate on day j , which is the cumulative hourly developmental or maturation rate given by:

$$D_j = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} D(T(h))$$

(2.3)

where $T(h)$ is the ambient temperature at hour h .

We normalise P , so that from birth (egg deposit) to full immature development, $0 < P < 1$, and from end of immature stage to adult death, $1 < P < 2$. When cohort reaches the normalized age threshold of 1, cohort switches to adult stage.

Development time revealing no significant difference between males and females (Roy et al. 2002), the model includes no difference between sex for either stage.

2.4.2.2 Oviposition

Adult females reach sexual maturity after a pre-oviposition period representing $10 \pm 2.8\%$ of the maximum life span (Roy et al. 2003a). When cohort reaches the normalized age threshold of 1.1, adult population is split in male and female cohort by a female biased constant sex ratio of 75% (Helle et Pijnacker 1985; Roy et al. 2003b). Adult females are allowed to oviposit until the normalized age of 1.95 (Roy et al. 2003a).

As described in Sabelis (1981), the daily oviposition data obtained at each constant temperature (Roy et al. 2003a) were classified in 10 age classes forming equal parts of the oviposition period, and subsequently expressed on 1.1 to 1.95 scales, to represent age-specific fecundity. The cumulative proportion of mean female oviposition was fitted with a

Weibull distribution function (Duthie 1997; Kim et Lee 2003; Kim *et al.* 2009a; Kim *et al.* 2009b; Kim et Lee 2010) with the PROC NLIN (SAS Institute Inc. 2009) using all temperature data. In the equation:

$$O(P) = a(1 - e^{-(b(P-c))^d}) \quad (2.4)$$

the parameter a (i.e. upper limit of the curve, $a = 1$) and c (i.e. lower limit at $O(P) = 0$, $c = 1.1$) were used as constants giving a two-parameter model:

$$O(P) = 1 - e^{-(a(P-1.1))^b} \quad (2.5)$$

The maximum potential fecundity of a *T. mcdanieli* female occurs at 24°C and was estimated at 150 eggs per female (Roy *et al.* 2003a). The proportion of the maximum fecundity (MF) per female as a function of temperature was fitted to the Duthie model equation (Duthie 1997). The parameters values were estimated using TableCurved2D (Systat Software).

$$O(T) = f1 * \frac{e^{\left(\frac{(T-b)*c}{d+1}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{(T-b)*c}{d+1}\right)}} \quad (2.6)$$

$$\text{Where : } f1 = a \left(\frac{d+1}{d}\right) * d^{\left(\frac{1}{d+1}\right)}$$

Where, a is the maximal fecundity (i.e. upper limit of the curve), b the optimum temperature when maximal fecundity occurs, c is the intrinsic rate of decline from the maximal as temperature deviates from the optimum and d is the difference as temperature increases or decreases from the optimum in the rate of acceleration in the decline from the maximum.

The cumulative number of eggs oviposited by a female at day j th is given by:

$$DO_j = (MF) * \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} O(T(h)) [O(P_{j+1}) - O(P_j)] \quad (2.7)$$

2.4.2.3 Mortality

Data on *T. mcdanieli* adult mortality were classified in age periods forming equal parts of the maximum life span. The age dependant mortality starting at 37% of the maximal longevity (Roy *et al.* data not shown), the cumulative age-specific mortality rate is defined as follows:

$$M(P) = 1 - e^{-(a(x-1.37))^b} \quad (2.8)$$

2.4.2.4 Predation

Predation mortality is manifested by reducing immature population in *T. mcdanieli* cohorts where individuals are between 0 and 0.6 normalized ages (i.e. eggs and larvae) by sharing out among cohorts a daily specific consumption of individuals by *N. californicus*, *N. fallacis* and/or *P. persimilis* motile stages. Predation is effective only during the activity period of predators, when the hourly temperature is between the upper and lower thresholds. The original model was constructed with a lower thresholds of 10, 12 and 15°C and a upper threshold of 32, 35 and 30°C for *N. fallacis* (Smith et Newsom 1970; Genini *et al.* 1991), *N. californicus* (Gotoh *et al.* 2004) and *P. persimilis* (Sabelis 1981) respectively (see **Figure 2.6**). A constant hourly predation rate is applied without regard to temperature range in the activity zone: 0.41 eggs or larvae per hour for *N. californicus*, 1.04 eggs or larvae per hour for *P. persimilis* (Friese et Gilstrap 1982) and 0.44 eggs or larvae per hour for *N. fallacis* (Smith et Newsom 1970). The predator dynamics is excluded from the model. The field abundance is used as an input to the model to effect predation.

2.4.3 Model testing

The project being undertaken in a commercial raspberry production, a negative control with application of acaricides was used instead of a control with no intervention to limit yield losses. For this reason, the dynamic simulation model could not be calibrated on spider mite dynamic population without predation. Model outputs (i.e. daily total number of spider mite individuals) were compared to field data obtained from experiment 1. Pearson's correlation analysis using paired data points extracted from the field experiment and the simulated sequence was conducted to test the robustness of the model outputs. For either treatment with release of predatory mites, the dynamic simulation model was evaluated and calibrated to achieve the best overall fit.

Sensitivity analyses were conducted by changing key parameter values (the initial egg density per leaflet, the initial adult density per leaflet, temperature-dependent total fecundity, the sex-ratio, the maximal developmental/maturation rate, the age-specific mortality rate and the lower temperature range for predator activity) and observing the response on spider mites population abundance.

2.5 Results

2.5.1 Field Experiments

2.5.1.1 Experiment 1

Repeated measure analysis indicates that average numbers of spider mites motiles and eggs per leaflet are significantly different among treatments (motiles : $F = 15.34$, $df = 2$, 13.1 , $P = 0.0004$; eggs: $F = 9.33$, $df = 2$, 13.2 , $P = 0.003$) and evaluation dates (periods) (motiles : $F = 20.63$, $df = 7$, 28.7 , $P < 0.0001$; eggs: $F = 19.14$, $df = 7$, 29.8 , $P < 0.0001$). The significant interaction of treatment X period (motiles: $F = 3.87$, $df = 14$, 35.5 , $P = 0.0005$; eggs: $F = 9.64$, $df = 14$, 36.6 , $P < 0.0001$) shows that the population fluctuation pattern differed between treatments. In the treatment Acaricide, no significant augmentation of spider mite motiles was observed over time ($F = 1.40$, $df = 7$, 28.7 , $P = 0.2446$) but eggs

increased significantly until week 3 ($F = 13.05$, $df = 7$, 29.8 , $P < 0.0001$) and, decreased after (**Figure 2.2**). In the treatment *N. californicus* + *P. persimilis*, despite 4 releases of predatory mites, the average number of spider mite motiles and eggs increased significantly over time (motiles: $F = 14.62$, $df = 7$, 28.7 , $P < 0.0001$; eggs: $F = 11.3$, $df = 7$, 29.8 , $P < 0.0001$) from 0.2 ± 0.02 to 21.6 ± 6.29 motiles and 2.9 ± 0.27 to 82.6 ± 25.7 eggs per leaflet. Similarly, the spider mite density significantly increased from 0.2 ± 0.02 to 32.3 ± 7.7 motiles per leaflet and 2.6 ± 0.25 to 126.3 ± 31.8 eggs in the treatment *N. fallacis* + *P. persimilis* (motiles: $F = 12.47$, $df = 7$, 28.7 , $P < 0.0001$; eggs: $F = 14.33$, $df = 7$, 29.8 , $P < 0.0001$). At the end of the experiment (week 7), significantly fewer spider mites motiles and eggs were present in the acaricide treatment compared to the two other treatments, but there was no significant difference among the predatory mites treatment (motiles: $F = 12.21$, $df = 2$, 12.9 , $P = 0.001$; eggs: $F = 12.41$, $df = 2$, 13.3 , $P = 0.0009$).

Phytoseiid populations differed among treatments ($F = 22.59$, $df = 2$, 12 , $P < 0.001$) and periods ($F = 5.13$, $df = 6$, 72 , $P = 0.002$), but there was no interaction ($F = 0.92$, $df = 12$, 72 , $P = 0.5332$). The increase of phytoseiid populations was slow. At week 5, there was an average of 0.08 ± 0.045 motiles per leaflet in the *N. californicus* + *P. persimilis* treatment and 0.1 ± 0.1 in the *N. fallacis* + *P. persimilis* treatment. It increased to respectively 0.38 ± 0.19 and 0.28 ± 0.22 in week 7, while the average of 0.04 ± 0.055 motiles phytoseiids recorded from acaricide treatment was significantly lower ($F = 11.25$, $df = 78$, $P < 0.0001$). These numbers include three indigenous species. In either treatment, very few adults

Neoseiulus spp. were collected and identified.

Phytoseiids spp. without *Phytoseiulus* sp.

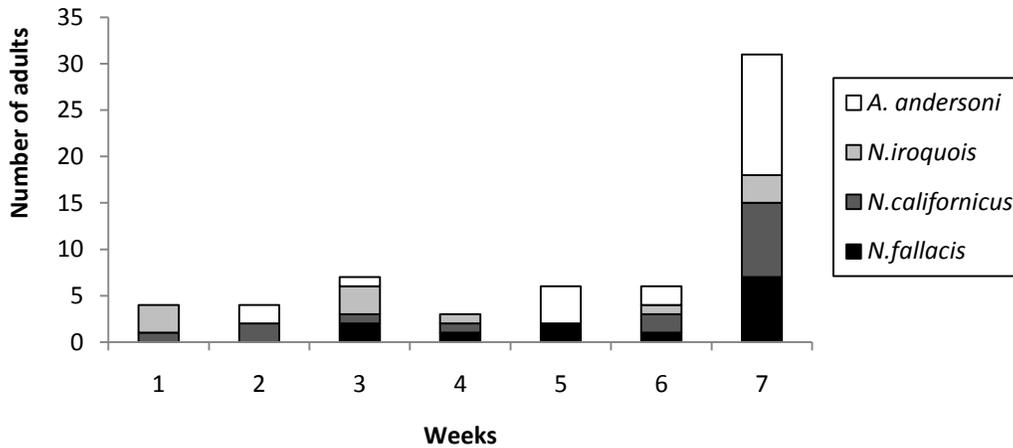


Figure 2.3 shows the weekly species composition of adult specimens identified each week in 2009. *Neoseiulus fallacis* and *N. californicus* were similar in number ($n = 13$ vs $n = 15$), *Amblyseius andersoni* Chant was the most abundant ($n = 22$) and *N. iroquois* the least ($n = 11$). It should be noted that in exploratory study undertaken in 2008, *N. iroquois* (70%) was the most abundant indigenous phytoseiids but we noted that *A. andersoni* had never been identified throughout the season (data not shown).

2.5.1.2 Experiment 2

In the control treatment with no release of predatory mites and no acaricide, the number of spider mite motiles per leaflet increased to an average of 6.2 ± 4 in week 4, declined to 3.9 ± 1.8 in week 5, increased again to 6 ± 3.6 in week 6, remained stable the next week and decreased to 4.5 ± 3 motiles per leaflet in week 8. Eggs reached a peak of 12 ± 5.6 per leaflet at week 4 and decreased to 1.6 ± 1.0 in week 8 (**Figure 2.4**). In the phytoseiid treatment without artificial mist, the spider mite motiles reached a peak of 2.2 ± 2.4 in week 4, decreased to 0.1 ± 0.3 and remained low until week 8. In the treatment with predatory mites and artificial mist, spider mite motiles increased to 1.7 ± 1.2 motiles per leaflet the first week, but decreased after and remained low until the end of the experiment. Eggs

decreased to almost 0 at week 3 in the predatory mite treatment with artificial mist and at week 5 in the predatory mites without artificial mist treatment. Despite the growth of spider mite population in the control treatment, for either motile spider mites or eggs, there was no significant difference with the other treatments (motiles: $F = 2.79$, $df = 2, 12$, $P = 0.1$; eggs: $F = 2.73$, $df = 2, 12$, $P = 0.11$). No significant difference was recorded over time for motile spider mites ($F = 0.9$, $df = 7, 39$, $P = 0.52$), but eggs were significantly lower at week 8 for both predatory mite treatments ($F = 5.57$, $df = 7, 37.8$, $P = 0.0002$).

Relative humidity increases aimed to foster the development of *P. persimilis*, but repeated measure analysis indicates no significant difference between the two predatory mite treatments ($F = 0$, $df = 1, 10.6$, $P = 0.96$). In the predatory mite treatment with artificial mist, the *P. persimilis* motiles reached a peak of 0.4 ± 0.2 per leaflet in week 2, decreased to 0.04 ± 0.05 in week 5 and remained low until the end of the experiment (week 8) (**Figure 2.5**). In the predatory mite treatment with no artificial mist, *P. persimilis* reached the same peak (0.4 ± 0.3) but two weeks later (week 4), and declined to 0.03 ± 0.02 at week 6.

Climatic conditions

Mean daily canopy temperatures and their minimum-maximum ranges are shown in **Figure 2.6** with suggested minimum and maximum temperature threshold for *N. fallacis*, *N. californicus* and *P. persimilis*. In May, high frequency of minimum daily temperature was below 10°C while maximum daily temperature rose up to 35°C .

2.5.2 Model simulation

2.5.2.1 Model calibration

The original model outputs in the *N. californicus* + *P. persimilis* treatment fit the pattern of field data well ($r = 0.991$), although a faster increase in the population of spider mites was predicted by the model than was observed. The original model was constructed by assuming no mortality other than predation on immature cohorts and adult age dependant

mortality. A general mortality factor of 0.1% on immature and adult cohorts was added to reduce spider mite population density (**Figure 2.7a**).

The original model outputs better estimated the initiation of spider mite outbreak in the *N. fallacis* + *P. persimilis*, whereas the final density was under estimated ($r = 0.974$) (see **Figure 2.7b**). To reach a better overall fit of the model outputs the predation rate induced by *P. persimilis* was divided by three.

2.5.2.2 Sensitivity analysis

Results of the sensitivity analysis are shown only for the treatment with releases of *N. californicus* and *P. persimilis*

Sensitivity to initial eggs and adults density per leaflet

Sensitivity analysis of the model to changes of the initial spider mite density was examined by running the model with the initial density of mite per leaflet increased or decreased by 0.1 individual per leaflet.

The model shows a high sensitivity to the changes of initial adult density while changes in egg initial density have little effect (**Figure 2.8**). Increasing the initial density by 0.1 adult per leaflet led to a 143% increase density (Immature + Adult) 8 weeks later.

Sensitivity to temperature-dependent total fecundity

The temperature-dependent maximum total fecundity (i.e. 150) was changed by a rate of 0.1 from 0.8 to 1.2. Decreasing the total fecundity by a rate of 0.2 allows a drop of final spider mite density per leaflet of 64%. Increasing the fecundity per female by the same rate allows a 100% increase of the final density per leaflet compared to the initial simulation (**Figure 2.9**).

Sensitivity to sex-ratio

The original model was constructed with a 0.75 female sex-ratio. Ratio changes had a high influence by affecting directly total daily oviposition. Model output of final spider mite

density for a 0.6, 0.65, 0.7, 0.8 and 0.85 sex-ratio lead, respectively, to a 64, 47, 25% decrease and 29, 62% increase (**Figure 2.10**).

Sensitivity to maximum development/maturation rate

The maximum development rate of immatures (i.e. 0.18/d) was changed by a rate of 0.1 from 0.8 to 1.2. Decreasing the maximum development rate by 0.2 allows a drop of final spider mite density per leaflet of 78%. Increasing the developmental rate by the same rate allows a 400% increase of the final density per leaflet compared to the initial simulation (**Figure 2.11**).

The maximum maturation rate of adult (i.e. 0.08/d) was changed by a rate of 0.1 from 0.8 to 1.2. Decreasing the maximum maturation rate by 0.2 allows a drop of density per leaflet of 82%. Increasing the maturation rate by the same rate allows a 62% increase of the final density per leaflet compared to the initial simulation.

Sensitivity to age-specific mortality rate

The age-specific mortality rate of adult multiplied by 5, 10, 30, 50 and 100 decreased the final density per leaflet respectively by 23, 31, 41, 43 and 46% compared to the initial simulation (**Figure 2.12**).

Sensitivity to lower temperature range for predator activity

The original model was constructed with a low temperature threshold of 12°C for the activity of *N. californicus*. Changing this parameter had high effect. Using a low temperature threshold of 10°C lead to an 47% lower final spider mites density while using a low temperature threshold of 15°C lead to a final spider mite density per leaflet 172% higher (**Figure 2.13**).

2.6 Discussion

2.6.1 Field experiments

2.6.1.1 Experiment 1

In our study, both treatments combined with releases of predatory mites have not proven control as effective as acaricide treatment. Our results show that spraying the active ingredient clofentezine can delay the population growth of spider mites on raspberry in tunnels over a period of two months.

For the introduction of biological control agents, it is recommended to split releases. Our objective was to apply the rate of 3 predatory mites per m² repeatedly for three consecutive weeks. Unfortunately, problems of availability of *N. californicus* and *N. fallacis* from distributors did not allow us to follow this protocol. The only possible release at 3 *N. californicus* or *N. fallacis*/m² early in the season was not enough to establish a sufficient predatory mite population.

In previous studies, the effectiveness of *N. californicus* and *N. fallacis* following low release has already been shown (Coop et Croft 1995; Croft *et al.* 2004; Fraulo et Liburd 2007). For example, conducting trials in a greenhouse and in the field, Fraulo et Liburd (2007) estimated that only one release at a rate of 1-2 *N. californicus*/m² in strawberry fields in Florida was sufficient to limit the increase in the density of spider mites over a period of four months. According to these authors, the timing of the release is not the most important factor the key factor being to use a predator: prey release ratio between 1: 5 and 1: 10. Rhodes *et al.* (2006) have obtained an equally and even superior success in the second year following two releases of *N. californicus* at release ratio of 1: 10 compared to two acaricide “Acramite” applications in a strawberry field (four-month field season). The difference in the architecture of strawberry and primocane fruiting raspberry plants can be responsible for this difference. Primocane fruiting raspberry plants can be more than two-meter tall at maturity which implies considerably more foliage than strawberry plants. Introduction rate based on a density per m² may not be appropriated in raspberry

production; recommend rates should be calibrated in terms height of plant and foliage volume.

In Belgium, a study in raspberries (cv. Autumn Bliss) grown under high tunnels showed that five introductions of the predator *Neoseiulus californicus* at a rate of 2 predatory mites/m² were sufficient to maintain populations of *T. urticae* to an acceptable density (i.e. 15 individuals or less per leaf) and a ratio of predator: prey greater than 1: 20 (Bylemans *et al.* 2003). In our study, the ratio of predator: prey on our first release was greater than 1: 2, but was not maintained over time and could not prevent the growth of mite populations. Our geographic location does not allow a direct comparison with the previous examples. Various factors such as density of foliage, dispersal, temperature, humidity and intraguild predation may explain the difficulty of establishing predators.

For predatory mites, the lack of contact between the leaves of adjacent plants increases the risk of falling to the ground during aerial dispersal (Coop et Croft 1995; Croft et Coop 1998; Jung et Croft 2000). For the first release, raspberry plants were in the leaf development stage and did not touch each other. After overexploiting patches of spider mites on a plant, some individuals may have tried to reach adjacent plant by aerial dispersal but likely fell on soil and suffered mortality.

The conditions under tunnels are not as favourable as those found in greenhouses. The low vegetation and the greenhouse effect during sunny afternoons make the tunnel environment very arid. In May, we recorded minimum humidity below 20% RH and calculated monthly average was 61.7% RH. It is likely that these conditions have caused the mortality of introduced predators, especially on *N. fallacis* which is more sensitive to low moisture content (Croft *et al.* 1993; Monetti et Croft 1997; Bounfour et Tanigoshi 2002).

Despite the high maximum temperature peaks, averages below 20°C and minimum near freezing in late May and early June were not favourable to the reproduction of predatory mites. Few data are available on the effect of low temperatures at night on the predation and the reproduction of *N. californicus* and *N. fallacis*. Hammamura *et al.* (1976) have observed that eggs of *P. persimilis* failed to hatch after storage period of more than six days

at temperature below 10°C. For eggs kept at 10°C for 5 days and then placed under conditions of 20°C and 70% RH, there was no alteration in the percentage of eggs reaching maturity. In contrast, if the temperature was increased to 35°C at a humidity of 75%, 24% of the eggs did not reach maturity (Sabelis 1981). In laboratory, a daily temperature and humidity variation between 22 to 30°C and 50 to 95% RH caused less mortality in immature stages of *N. fallacis* as mean constant temperature and humidity (Kramer et Hain 1989). Additional tests are needed to quantify the survival of spider mites and predatory mites exposed to broad temperatures (2 to 35°C) and humidity (20 to 95%) daily ranges as it has been found here under high tunnels in the spring.

For poikilotherm organisms, a decrease in ambient temperature causes a reduction in physiological processes, thereby reducing dispersion, predation and reproduction. Auger *et al.* (1999) observed a significant decrease in dispersion of *N. californicus* at 15°C compared to higher temperature. A decrease in dispersion due to low temperature, aggregative distribution of prey in the early season, the limited amounts of available pollen as an alternative food source under high tunnels during this period, may all cause periods of starvation. Repeated periods of starvation can significantly reduce the longevity of adult female *N. californicus*, their total fecundity and the total number of prey consumed per female in a lifetime (Gotoh et Tsuchiya 2009). Skirvin et Fenlon (2003b) associated the decrease in *P. persimilis* predation as decreased locomotion above 25°C. On strawberry leaves, no matter the density of available eggs of *T. urticae*, at 15°C (humidity level not specified), a female of *N. californicus* does not eat more than 5 eggs per day compared to 25 eggs per day at 35°C (Ahn *et al.* 2010). At a constant temperature of 15°C, *T. mcdanieli* lays an average 1.5 to 2 eggs per day (Roy *et al.* 2003a).

We initially thought that the indigenous species *N. fallacis*, naturally occurring in North America temperate-humid regions, known to overwinter in Quebec and that possibly feeds and reproduces in the range of 9 to 32°C (Applied Bio-nomics Ltd.), would show better establishment and control of spider mites. However, the results obtained in our study do not indicate a better establishment of *N. fallacis*, perhaps due to periods of starvation as mentioned above for *N. californicus* or to low humidity (Bounfour et Tanigoshi 2002).

Predatory mite identifications showed that the native predator *A. andersoni* was present on raspberry plant. This species is a high risk IG predator for *N. californicus* and *P. persimilis* (Walzer et Schausberger 2011). The larger polyphagous *A. andersoni* also outcompeted the oligophagous *N. fallacis*. It is more likely that *A. andersoni* could interfere with the establishment of introduced predatory mites because these avoid depositing eggs in a colony of spider mites when they perceive the presence of *A. andersoni* adults. Among the four species of phytoseiids, *A. andersoni* gains the most for its development by feeding on these conspecific (Croft et Croft 1996; Croft *et al.* 1996; Walzer et Schausberger 2011).

Our results also suggest that combining a low-toxicity miticide with predatory mites releases might advantageously be used early in the season when the daily temperature and humidity are fluctuating widely and the small amount of foliage offers few contacts between plants (Strong et Croft 1996; Bounfour et Tanigoshi 2002). It is known that *P. persimilis* fails to establish and does not offer an optimal control of spider mites under conditions of high temperature and low humidity (Force 1967; Stenseth 1979; Weintraub et Palevsky 2008). In our study, the days that followed the release of *P. persimilis*, minimum, average and maximum humidity approaching 40, 60 and 80%, respectively, were not optimal. Mortality was observed on introduced predators (data not shown). The results of Experiment 1 inspired the methodology for Experiment 2.

2.6.1.2 Experiment 2

Statistical analysis showed no significant advantages of artificial mist for the establishment of *P. persimilis* and suppression of spider mites. Despite appearances, we cannot conclude that the introduced predatory mites significantly reduced spider mite populations compared to control treatment. This can be explained by the high variability in the density of mites among samples probably due to the gregarious nature of this pest. In cages where spider mites were abundant, their rapid decline caused the decline of predators, which may have prevented to observe an effect of artificial mist on the development of predators over a long period as observed by Linder *et al.* (2003) On cucumber, due to poor establishment of *P. persimilis*, Duso *et al.* (2004) found that water on the foliage following episodes of mist was responsible for the decrease in spider mites populations compared to the control

without humidification. The method of humidification we used wetted the foliage thoroughly and could have lead to direct mortality of spider mites.

Our manual method of humidification resulted in an oscillation of relative humidity in the air. The installation of an automated misting system to improve the climate might be more consistent for the establishment of *P. persimilis*.

The humidity control is a more important issue in the first two months of raspberry growth due to low density of foliage. Also, early season is the most crucial moment for the establishment of predators to ensure extended control. It would be interesting to repeat this trial in a context of lower foliage density for more meaningful conclusions.

2.6.2 Model

2.6.2.1 Structure and sensitivity of the model

Spider mite population evolving under high tunnel is a complex system to model taking into account the rapid life cycle of mites, the overlapping generations and the temperature fluctuating below and above activity threshold. Nevertheless, we succeeded to mimic this complex system with minimal discrepancies with field data by elaborating a simulation model relatively simple in his structure and its number of components.

After calibration, the model predicted well the timing of spider mites outbreak, the key event in the simulation. Overall, outbreak is predicted lightly later in the *N. fallacis* treatment compared to the *N. californicus* treatment. This gap can be explained by the extinction of adult female spider mites and then a break in the oviposition during two days. Due to the higher predation rate, no immature individuals reached the adult stage before all individuals of the first female adult cohort were died in the *N. fallacis* treatment. This extinction of adult female individuals did not happened during field experiment. A better understanding of mortality factors would allow an increase in the prediction of outbreak and of final spider mite abundance.

The model is surprisingly sensitive to a slight change in the initial adult density per leaflet, showing the importance to well understand mortality affecting spider mites early in season. Adult female abundance directly affects the daily oviposition and then the number of immature individuals in the new cohort created. Early in season, when the predation is limited by low temperature, higher size of cohort may influence the timing of the outbreak like we saw in our treatments. Also, in 2009, we started Experiment 1 with 0.3 lower spider mite egg density per leaflet in the *N. fallacis* treatment (treatment 1). To our knowledge, this minimal difference was not significant, but following our model, that could have had an impact on the results obtained.

Whereas the development time of immature individuals is the parameter to which the model is the most sensitive, all the parameters that affected numbers of immature individuals (*i.e.* total fecundity, sex-ratio, predation rate) have a clear influence on the spider mite dynamic. The value of those parameters has critical repercussion on model outputs. It is known that biological processes, which happened over a range of values that will add some randomness, may lead to major changes in population dynamics.

In contrast, the model is insensitive to age-specific mortality rate changes. That can be well explained by the pattern of oviposition. Most eggs are deposited during the first half of the female life span before age-specific mortality occurs.

2.6.2.2 Applications of the simulation model and strategy for improvement

The simulation model attempted to mimic the detailed dynamic of the spider mites evolving on primocane-fruiting raspberry growing under high tunnel. Temperature is a major factor influencing arthropod development and is a critical parameter for the management of spider mites. For this reason, we included this driving variable in our model. At this stage, the simulation model is useful to assess the relative contribution of components on the spider mites population. It can be used as a basic tool to estimate the spider mites population abundance in response to hourly temperature changes. This tool is also interesting to compare spider mite population evolving under high tunnel or outside.

Ideally, the model should have first been constructed without predation rate components and outputs compared to field data. Like mentioned previously, that was not possible in our experimental context. Then, the dynamic simulation model including the predation component was calibrated with field data.

Constructing a sub-model for each predatory mite was not an aim in the project. Then, a predation component derived from population abundance field data and constant predation rate during activity period was incorporated. In this way, the model shows the power of temperature threshold on predation but yields no information on the dynamic interaction between different predatory mite species and their prey. Indeed, some important components for predatory mites such as age-structure and searching behavior are not under consideration. Otherwise, the model shows the importance of lower temperature threshold for predation on spider mite population abundance. Nevertheless, more study should focus on the response of predation to driving variable such as temperature and humidity to improve quality of spider mites-phytoseiids simulation models.

Simulation model of population dynamic can be constructed at different levels of complexity. The model is purely deterministic in its construction. The computer programs used did not allow generating randomness. Physiological functions are parameterised in terms of the means values for punctual temperature or age. Including some variability in parameters would be closer to processes affecting natural populations, but would considerably increase the complexity of modeling.

Parameters extracted from laboratory experiment are generally less accurate than parameters extracted from experiments conducted in conditions similar to the system being modeled (e.g. parameter related to the degree-days accumulation timing an event). Nevertheless, physiological data used to construct the model (those of the work of Roy et al.) came from studies conducted on a strain of McDaniel spider mites originating from Quebec, allowing less risk of discrepancy owing to geographical origin.

To use a simulation population model as a decision-making tool, it must be validated on several independent population data and predict the number of individuals with sufficient

accuracy. A validation of our model through the use of additional field data is required. Nevertheless, the similarity between the model outputs and observed data gives us the confidence of the usefulness of this model to predicted the timing of spider mites outbreak and to estimate the number of individual spider mite in response to temperature change, and can enlighten raspberry growers on the discrepancy between spider mite management under high tunnel cropping system and management outside tunnel.

2.7 Acknowledgments

Special thanks go to Serge Gagnon (Plant-Prod Québec), Sébastien Jacob (Biobest Biological Systems) and Thierry Chouffot (Koppert Biological Systems) for their technical assistance and Les Fraises de l'Île d'Orléans inc. for plant and their technical supplies and assistance. We thank Mario Fréchette (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec) and Frédéric Beaulieu (Agriculture et Agroalimentaire Canada) for their acari taxonomy expertise, Hélène Crépeau for her statistical assistance and Andrée Rousseau, François Lefebvre, Joseph Moisan-De Serres and Olivier Lalonde for their technical assistance. The authors are grateful to Stéphanie Tellier agr. (MAPAQ) and to Association des Producteurs de Fraises et Framboises du Québec for their support to the project. Funding for this project was provided by a grant of Programme de soutien à l'innovation de l'horticulture, MAPAQ to V.F. and M.R. and a scholarship from CRSNG and FQRNT to É.L.

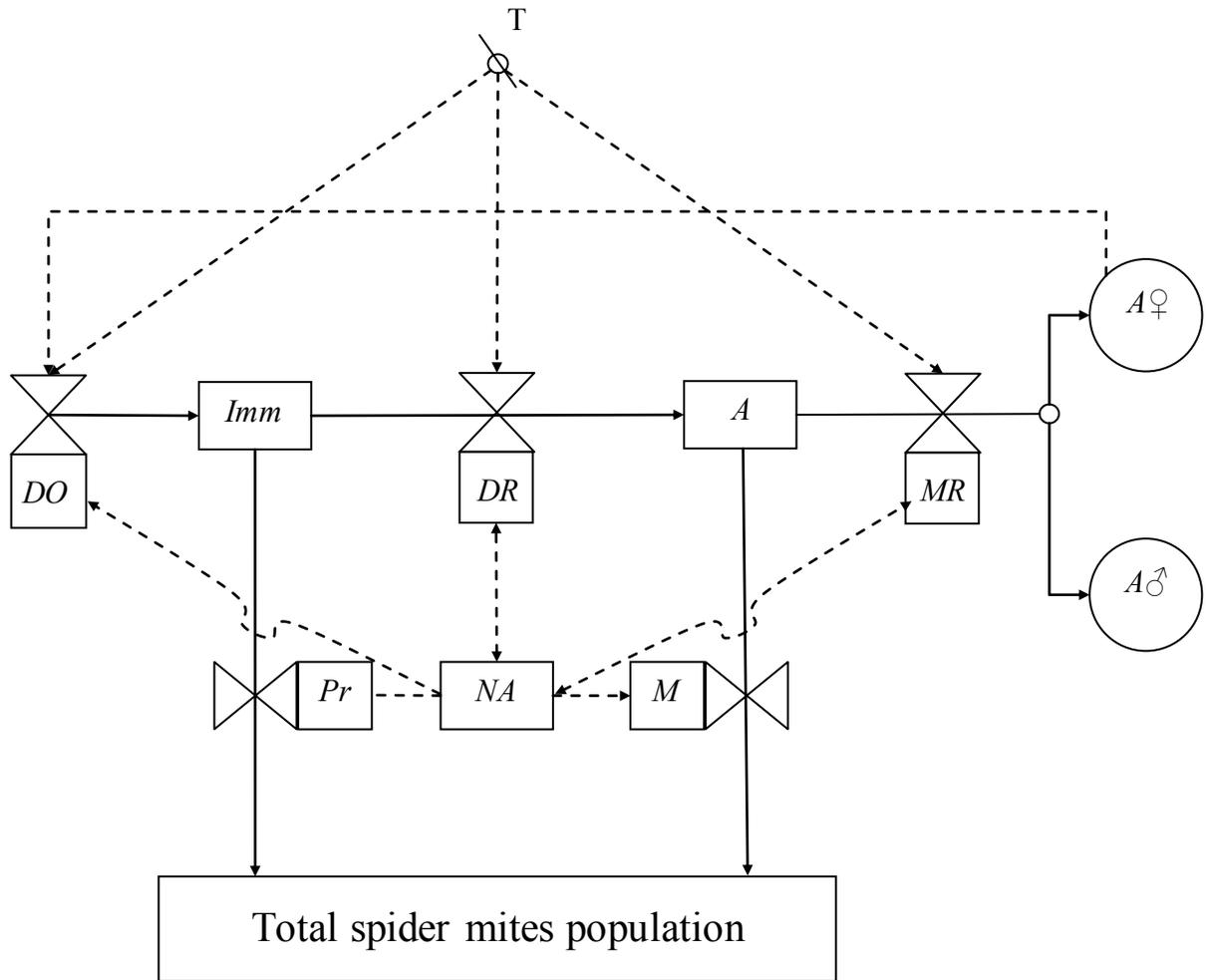


Figure 2.1 Simplified diagram of *T. mcdanieli* model; *Imm*: immatures; *A*: adults; *NA*: normalised age; *DR*: development rate; *MR*: maturation rate; *Pr*: predation; *M*: age dependant mortality; *DO*: daily oviposition; *Pr*: predation rate.

Tableau 2.1 Estimated values of parameters used in each equation of the dynamic population model

Models	Parameters	Estimated values	S.E.M.	RSS	r²
Lactin 2					
Immature developmental rate	ρ	0.00688	0.000243	0.000372	0.99
	T_L	39.4002	0.2933		
	ΔT	0.7768	0.1650		
	λ	-1.0825	0.00707		
Adult maturation rate	ρ	0.00555	0.0008	0.00378	0.89
	T_L	39.2568	1.7498		
	ΔT	0.6139	0.8636		
	λ	-1.0743	0.0227		
Weibull					
Age-specific cumulative oviposition rate	a	2.289	0.0260	0.2324	0.99
	b	1.9154	0.0605		
Age-specific cumulative mortality rate	a	2.0094	0.0605	0.0173	0.99
	b	2.5453	0.2805		
Duthie					
Temperature-dependent total fecundity	a	1.0289		0.0345	0.99
	b	27.1474			
	c	0.4962			
	d	2.3746			

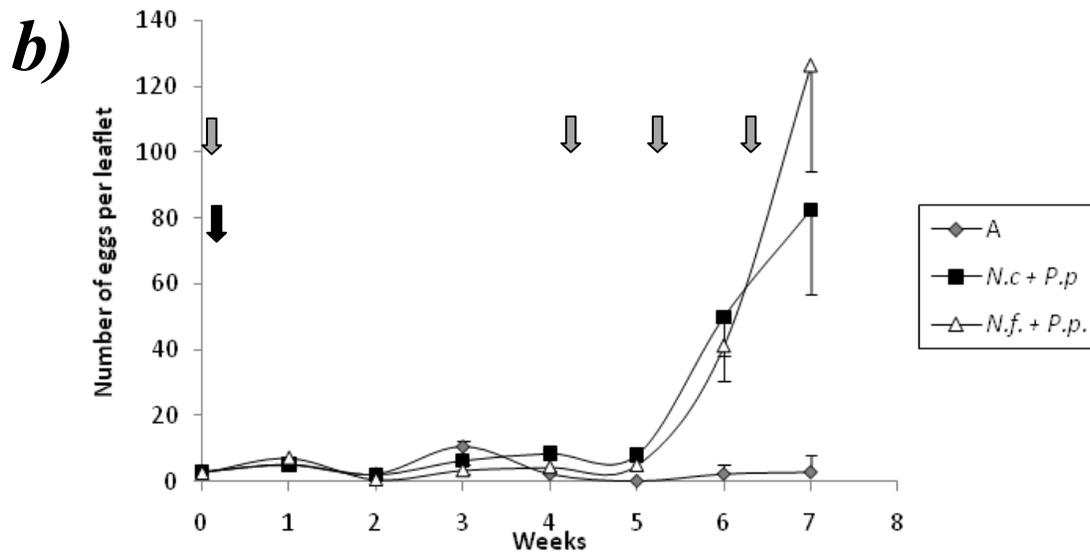
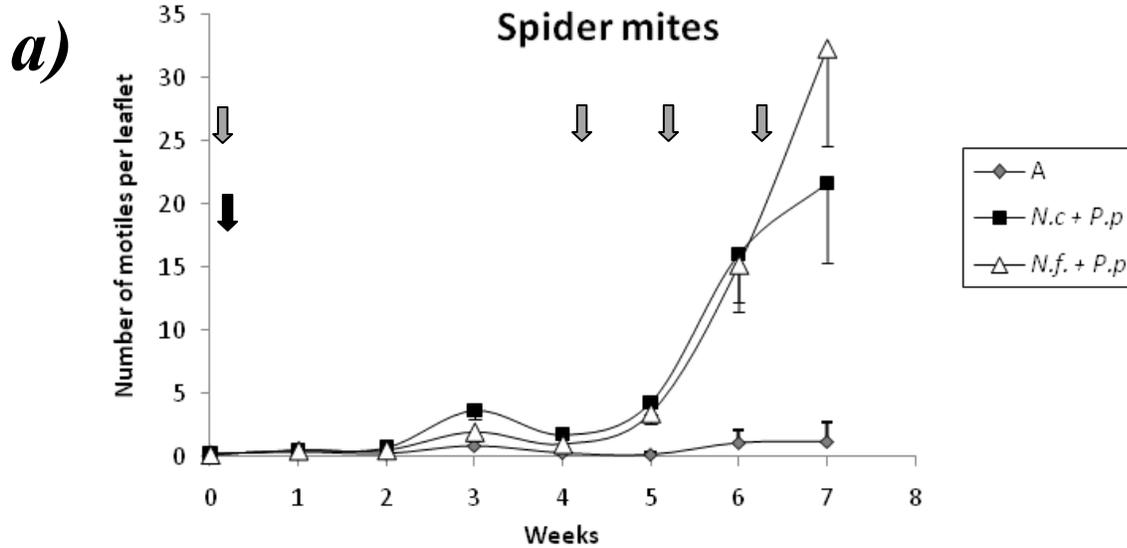


Figure 2.2 Weekly average spider mites (-SEM) in Experiment 1 (May to July 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec; (a) motiles and (b) eggs per leaflet (A = Apollo, *N.c. + P.p.* = *N. californicus* and *P. persimilis* combined release, *N.f. + P.p.* = *N. fallacis* and *P. persimilis* combined release. Black arrows represent the application of clofentezine; Grey arrows represent the predatory mite releases.

Phytoseiids *spp.* without *Phytoseiulus sp.*

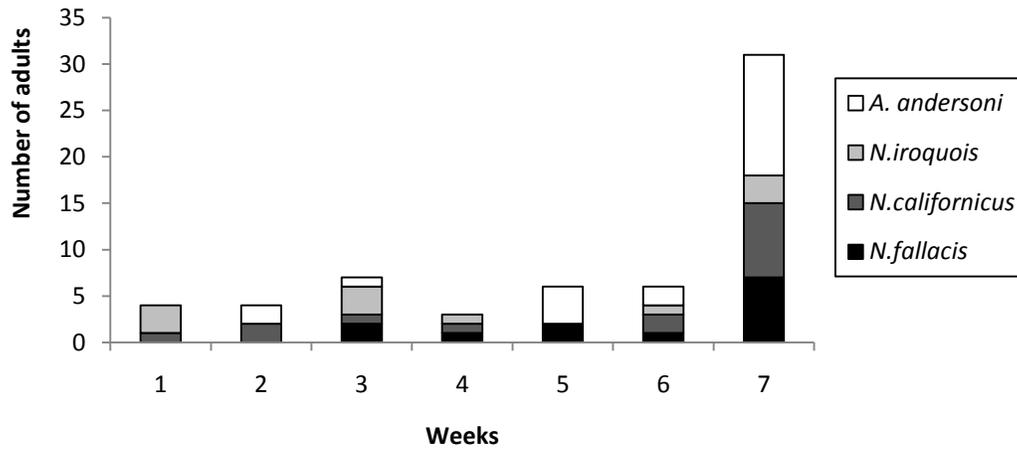


Figure 2.3 Species composition of weekly *Neoseiulus spp.* and *Amblyseius sp.* adults identified in Experiment 1 (May to July 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec.

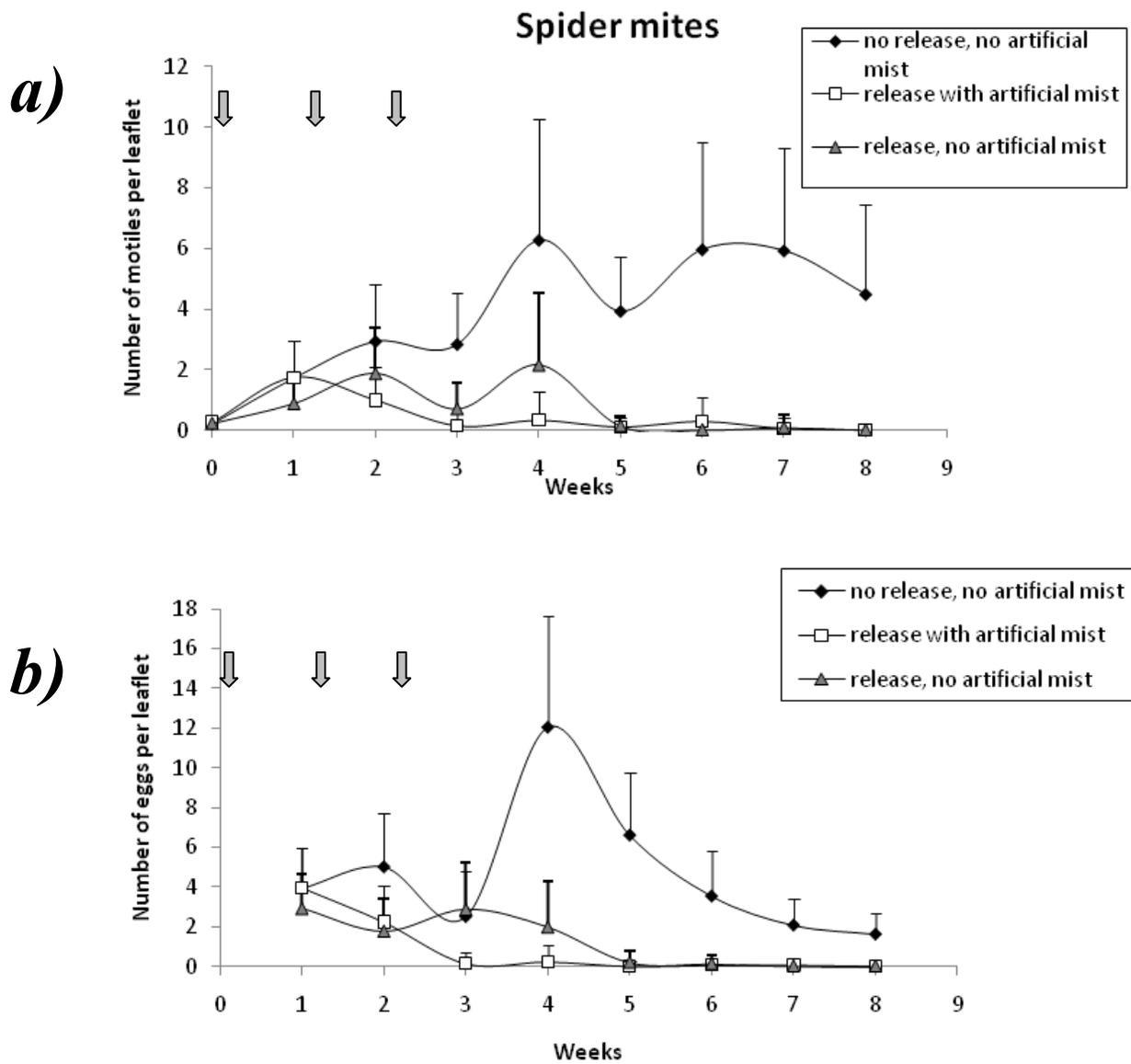


Figure 2.4 Weekly average spider mites (+SEM) in Experiment 2 involving artificial mist (August to October 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec; (a) motiles and (b) eggs per leaflet. Grey arrows represent the *Phytoseiulus persimilis* releases.

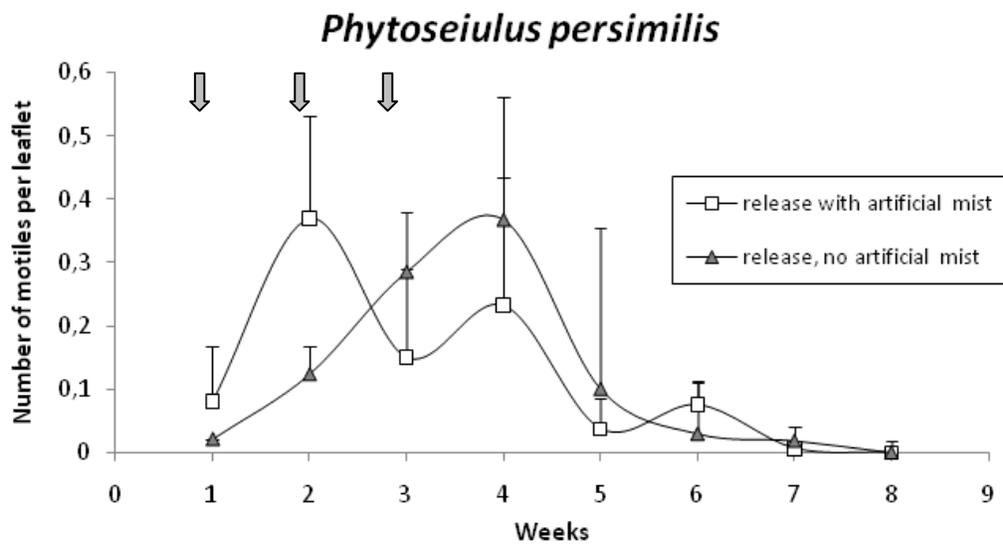


Figure 2.5 Weekly average of *Phytoseiulus persimilis* motiles (+SEM) per leaflet in Experiment 2 (August to October 2009) in Saint-Laurent Ile d'Orleans, Quebec. Grey arrows *Phytoseiulus persimilis* releases.

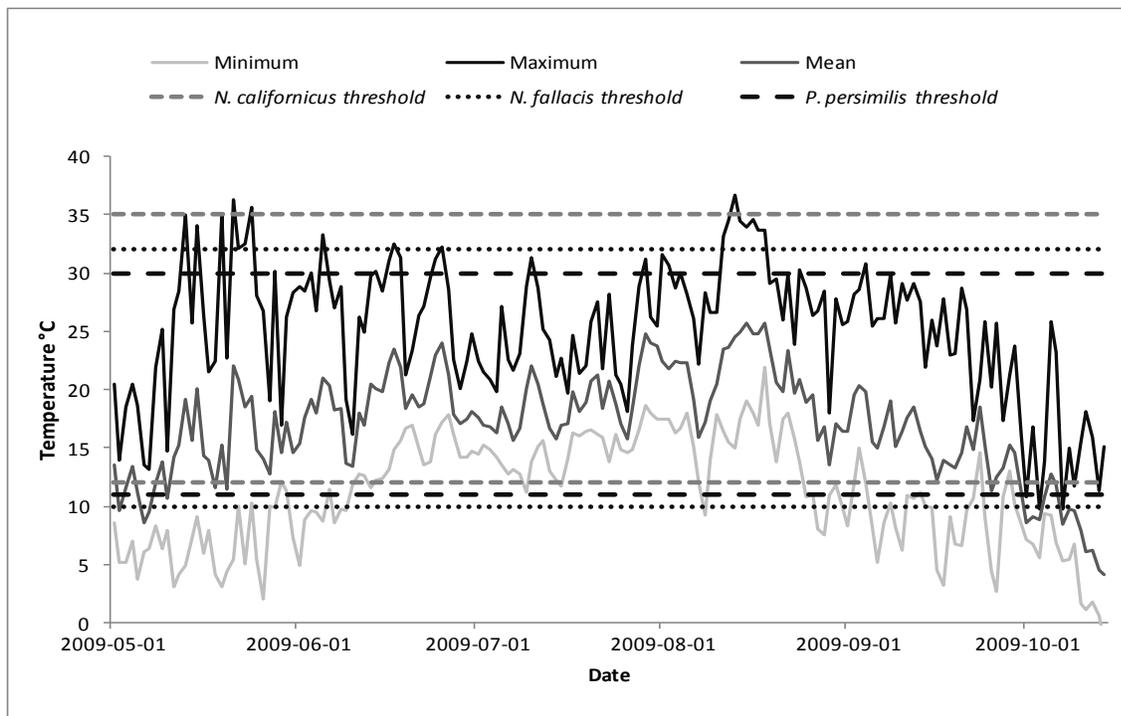
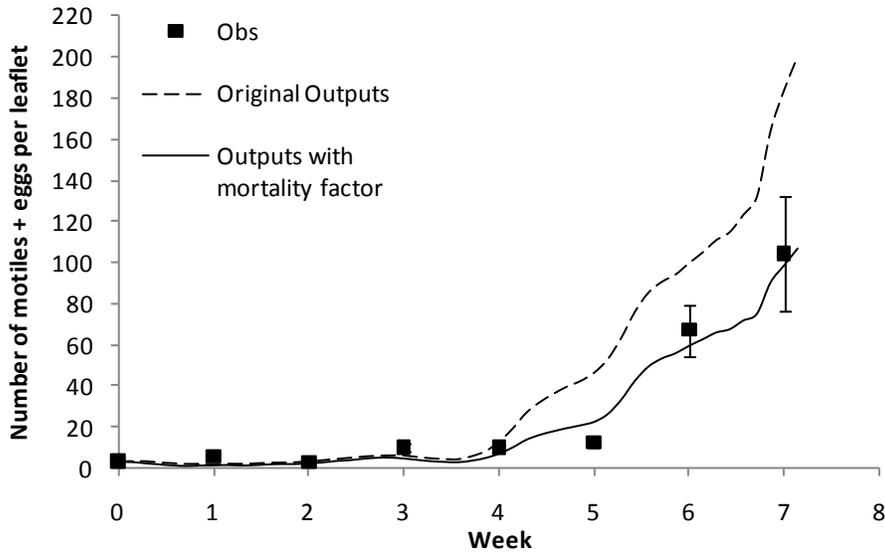


Figure 2.6 Minimum, maximum and mean temperatures recorded in raspberry under high tunnel during season 2009. Dashed lines show minimum and maximum temperature thresholds for *N. fallacis*, *N. californicus* and *P. persimilis* activity.

a)



b)

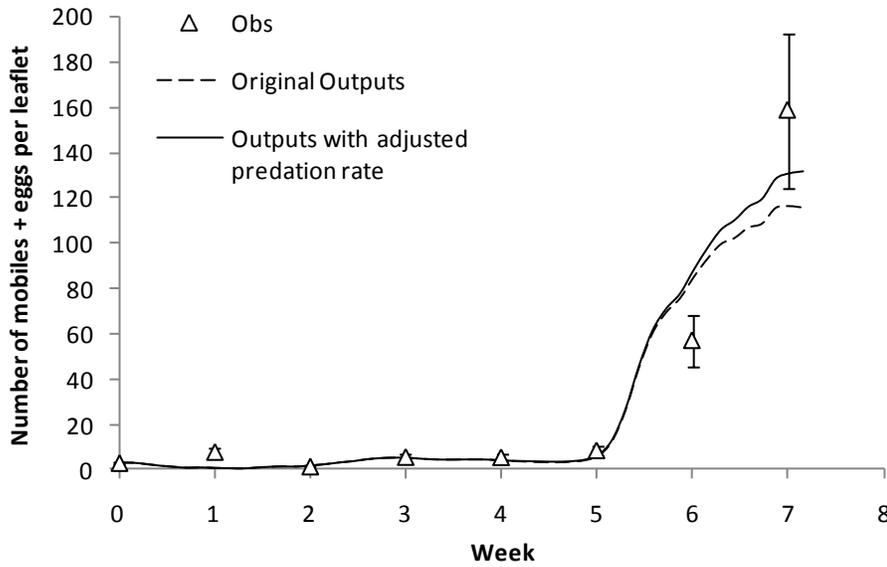


Figure 2.7 Comparison of the *T. mcdanieli* model simulation outputs, with and without mortality factor, with the sampling data (Experiment 1) in a) *N. californicus* and *P. persimilis* combined release treatment and b) *N. fallacis* and *P. persimilis* combined release treatment.

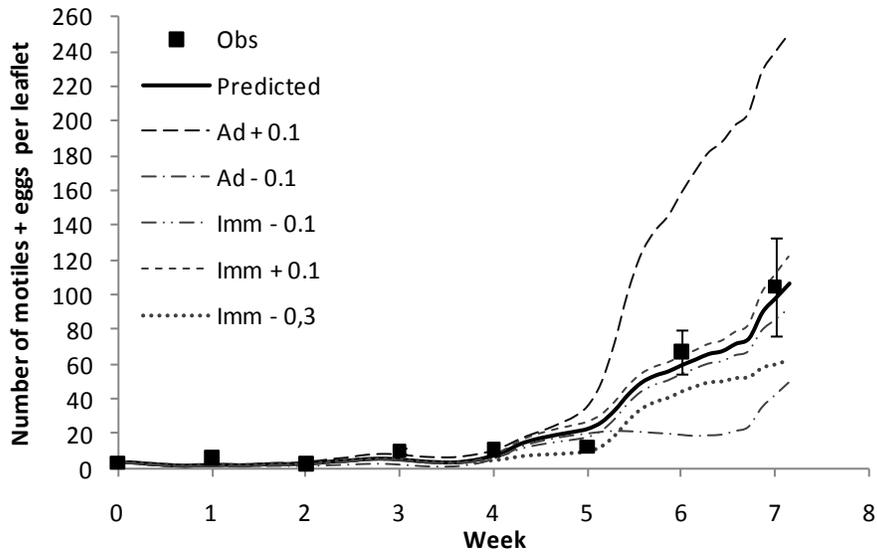


Figure 2.8 Sensitivity of model predictions to initial spider mite density (immatures and adults) parameter

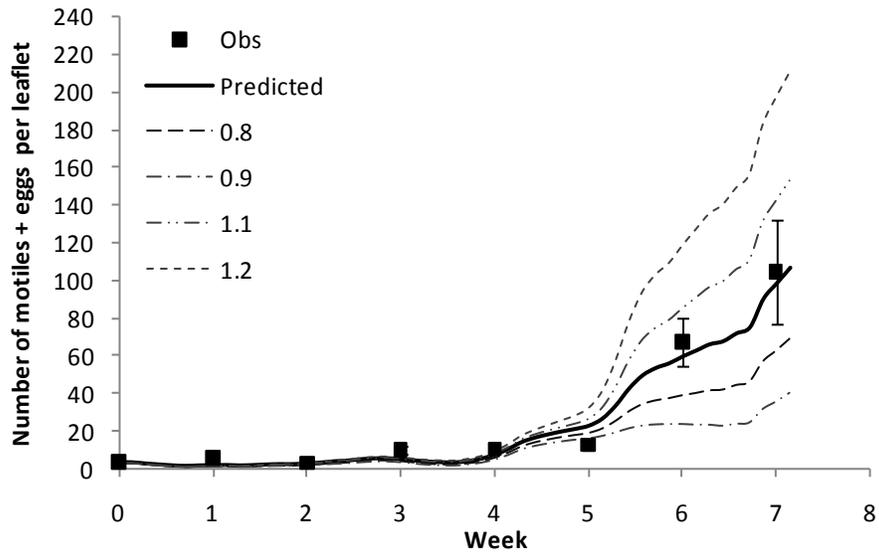


Figure 2.9 Sensitivity of model predictions to temperature-dependent total fecundity parameter

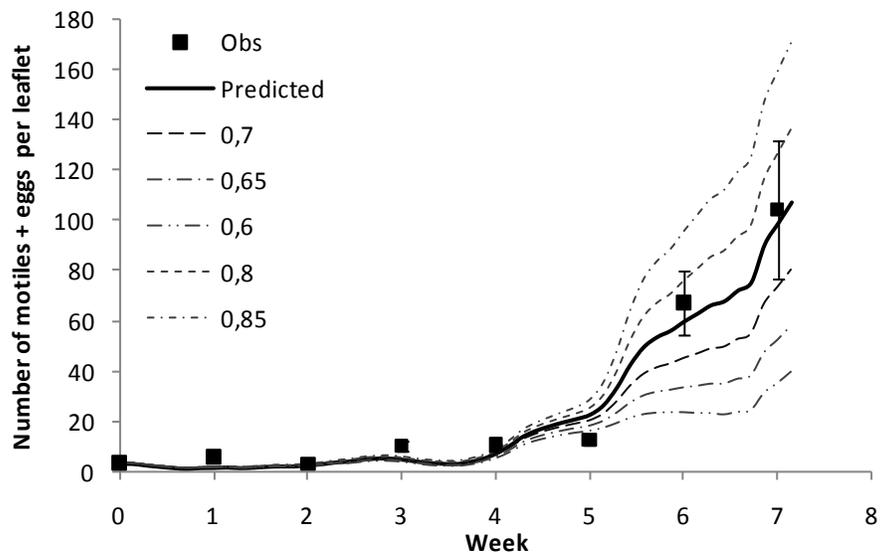


Figure 2.10 Sensitivity of model predictions to the sex-ratio parameter

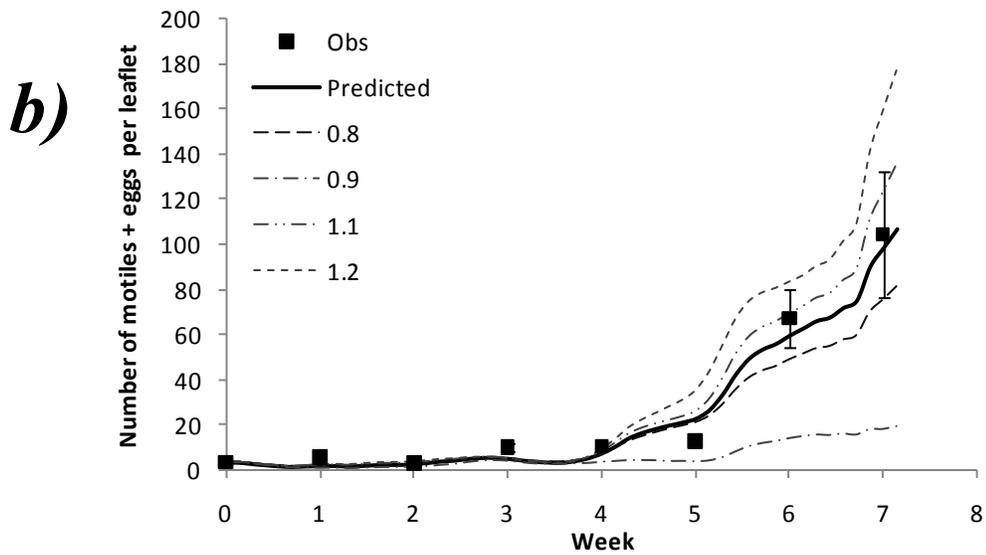
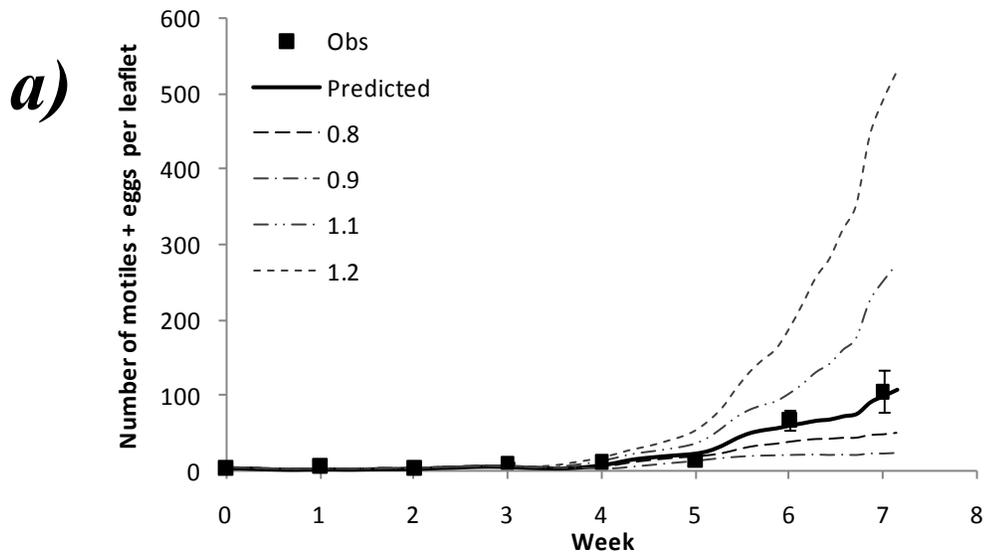


Figure 2.11 Sensitivity of model predictions to the maximum development/maturation rate parameter a) immature; b) adult

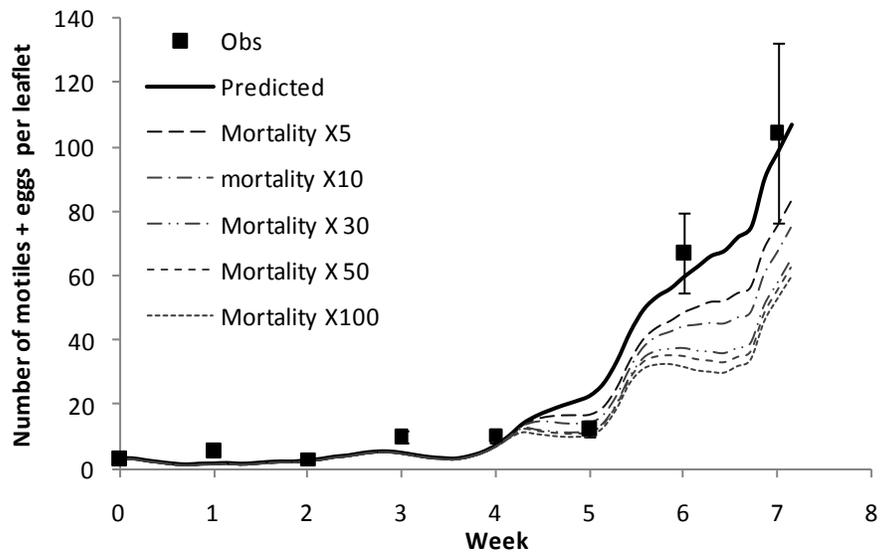


Figure 2.12 Sensitivity of model predictions to the age-specific mortality rate parameter

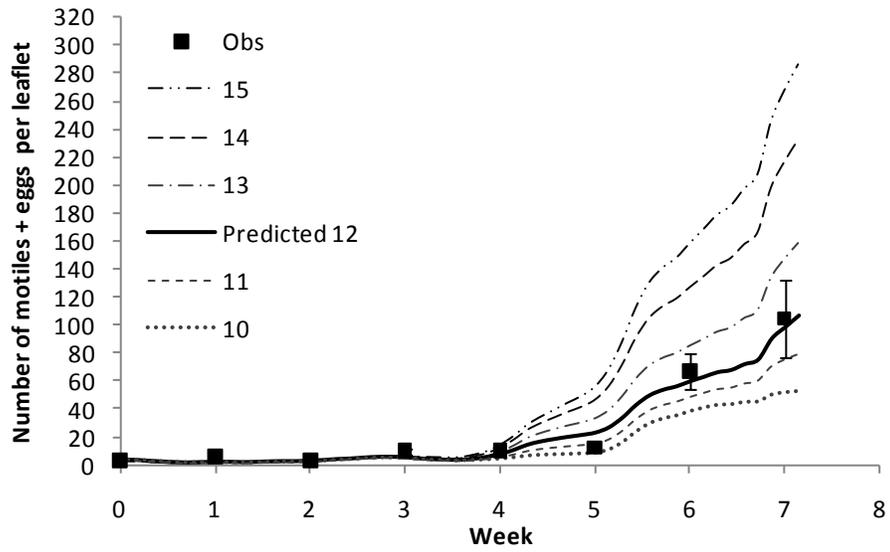


Figure 2.13 Sensitivity of model predictions to the lower temperature threshold for predator activity parameter

Chapitre 3: Conclusion générale

Dans ce projet, l'efficacité de trois espèces d'acariens prédateurs (*N. fallacis*, *N. californicus* et *P. persimilis*) à réprimer les tétranyques a été évaluée dans la production du framboisier remontant sous tunnels et un modèle de simulation dynamique de l'évolution des populations de tétranyques en réponse à la température fluctuante enregistrée sous tunnel a été conceptualisé. La réalisation de ce projet a permis de faire l'acquisition de connaissances utiles sur la phénologie des tétranyques et de leurs prédateurs dans le contexte d'un nouveau système de production et de mieux cerner certaines difficultés auxquelles les producteurs québécois doivent faire face.

3.1 La lutte aux tétranyques par l'introduction d'acariens prédateurs phytoséïdes

La première hypothèse spécifique selon laquelle les prédateurs phytoséïdes permettent une répression des populations de tétranyques équivalente à celle obtenue avec les traitements acaricides a été infirmée. Ainsi, suite à cette première étude réalisée au Québec dans les framboisières sous tunnels, nous ne pouvons confirmer que l'introduction d'acariens phytoséïdes prédateurs de tétranyques est une méthode de lutte qui offre une répression des tétranyques équivalente à celle obtenue avec un traitement acaricide (clofentezine). Toutefois, les pistes de solutions sont nombreuses pour que cette hypothèse puisse être confirmée dans un avenir rapproché. Les faibles taux de lâchers dus au problème de disponibilité des prédateurs ainsi que les conditions climatiques non optimales pour leur établissement sont jugés comme étant les principaux facteurs ayant entraîné un succès mitigé de la lutte biologique dans le cadre mon projet.

L'utilisation d'agents de lutte biologique en horticulture gagne en popularité à un point tel que les fournisseurs n'arrivent pas à répondre à la demande à certaines périodes (É. Lemaire obs. pers.). Cette problématique nous a empêché d'introduire les prédateurs *N. fallacis* et *N. californicus* trois semaines consécutives entre la mi-mai et la mi-juin telle que nous l'avions prévu au départ. Ainsi, au début du projet, une seule introduction a un taux de

3 prédateur/m², bien qu'efficace dans d'autres systèmes de production (e.g. fraise) (Fraulo et Liburd 2007), n'a pas suffi à établir une population d'acariens prédateurs suffisante pour prévenir l'augmentation des populations de tétranyques.

Les délais de livraison et l'impossibilité de synchroniser les commandes en fonction des conditions climatiques favorables aux lâchers sont des facteurs limitant l'introduction de prédateurs en productions extérieures (M. Marel comm. pers.). Les tunnels permettent plus de flexibilité quant aux moments de lâchers une fois la commande reçue. En revanche, un problème de disponibilité et un délai de livraison prolongé peuvent entraîner une perte de contrôle des populations de tétranyques plus rapide sous tunnels due aux conditions plus optimales pour son développement. Dans une telle situation, il est primordial d'avoir une excellente connaissance du système de production et de la dynamique de population du ravageur afin de prévoir les commandes plus de deux semaines à l'avance.

L'entreprise Anatis bioprotection commercialise depuis tout récemment une souche de *N. fallacis* d'origine québécoise sur feuilles de haricot. Ce nouveau produit à proximité contenant tous les stades actifs du prédateur contribuera certainement, par sa disponibilité et sa qualité, à augmenter l'efficacité des lâchers de prédateurs dans les framboisères sous tunnels.

Le ratio prédateur : proie et la densité de tétranyques au moment de l'introduction des prédateurs sont des facteurs déterminant la réussite de la lutte biologique (Greco *et al.* 2005; Fraulo et Liburd 2007). Lors de notre première saison de terrain en 2008, la forte quantité d'œufs et de jeunes larves de tétranyques présents sur le feuillage de framboisiers dans les tunnels à la fin mai nous a incité à effectuer un traitement à la clofentezine avant l'introduction des acariens prédateurs. Suite au traitement, l'expérience composée de quatre répétitions d'un traitement témoin et d'un traitement avec introduction d'acariens prédateurs fut mise en place. Une unité expérimentale était constituée de quatre rangs de framboisier de 50 mètres de longueur. Un second acaricide a dû être appliqué en juillet sur nos parcelles témoins car les densités de tétranyques avaient atteint une valeur moyenne de 11 formes mobiles par foliole, exposant le producteur à une baisse de sa production. Cela a

compromis les analyses statistiques, ce qui explique pourquoi les données recueillies en 2008 ne sont pas présentées dans ce document. Toutefois, il importe de dire que dans les parcelles avec lâchers d'acariens prédateurs, les lâchers successifs, totalisant 91 prédateurs/m², effectués suite au traitement acaricide du mois de mai ont réussi à maintenir les tétranyques à des densités moyennes inférieures à trois formes mobiles par foliole jusqu'à la fin de la saison.

Les résultats obtenus en 2008 et 2009 suggèrent qu'une application d'un acaricide à faible impact pour la faune auxiliaire en début de saison lorsque la population de tétranyques est élevée et que les conditions climatiques ne sont pas favorables à l'établissement des prédateurs, peut être plus appropriée qu'une introduction hâtive de prédateurs. Toutefois, avant de recommander cette approche, il serait intéressant de faire de nouveaux essais avec des lâchers plus massifs (e.g. lâchers de 20 prédateurs/m² répétés un minimum de trois fois; S. Jacob comm. pers.) du prédateur *N. californicus*, de la nouvelle souche disponible du prédateur indigène *N. fallacis* ou même du prédateur *A. andersoni*. Effectivement, ce projet a également permis de caractériser le complexe d'acariens phytoséïdes indigènes présents dans une framboisière de l'Île d'Orléans, dont *A. andersoni* Chant et *N. iroquois* (Chant et Hansell). Le prédateur intragilde (IG), *A. andersoni* est susceptible de jouer un rôle clé en influençant la dynamique prédateur : proie dans ce système de production. Ce nouvel élément est à considérer dans la poursuite du développement de la lutte intégrée aux tétranyques dans les framboisières sous tunnels, d'autant plus qu'il est depuis peu disponible commercialement.

3.2 Optimisation des conditions climatiques sous tunnels

Notre première année de terrain en 2008 ainsi que le premier essai de 2009 nous ont permis de constater que les conditions de température et d'humidité fluctuantes et extrêmes les jours succédant les lâchers de prédateurs nuisent grandement à leur établissement, particulièrement dans le cas de *P. persimilis*. En effet, les données de température et d'humidité enregistrées par les lecteurs Hobo et l'observation d'une forte mortalité du prédateur *P. persimilis* les jours suivants son introduction suggèrent que les conditions sous

tunnels ne sont pas optimales à son développement. Ces observations ont inspiré la seconde hypothèse spécifique selon laquelle une vaporisation d'eau (i.e. humidification artificielle) optimiserait le taux d'humidité relative sous tunnels et faciliterait ainsi l'établissement du prédateur *P. persimilis*. Il est clair dans la littérature que la performance du spécialiste *P. persimilis* et du généraliste *N. fallacis* est affectée par un taux d'humidité relative inférieure à 60% (Sabelis 1981; Croft *et al.* 1993). Cependant, les résultats obtenus au cours de la deuxième expérience réalisée en 2009, soit l'évaluation de l'ajout d'une humidification artificielle sur l'établissement de *P. persimilis* n'ont pas permis de tirer des conclusions positives avec cette approche. En effet, les prédateurs introduits semblent avoir trouvé refuge dans le feuillage dense des framboisiers et avoir réprimé les foyers localisés de tétranyques avant qu'il soit possible d'observer l'effet des traitements. Il serait intéressant de reprendre cet essai avec un système automatisé plus performant en début de saison lorsque la régulation de l'humidité est un enjeu plus important due à la faible densité de feuillage. Cette approche a déjà fait ses preuves en serres et nous croyons toujours que les producteurs auraient avantages à l'utiliser sous tunnels.

Les tunnels peuvent être perçus comme un environnement contrôlé. Ces nouvelles structures sont par contre bien loin d'offrir la latitude de gestion du climat qu'offrent les serres. Une certaine régulation peut tout de même être faite par l'ouverture et la fermeture de porte ou le relèvement des plastiques sur les côtés. Il est important que les producteurs désirant investir dans la gestion des tétranyques par l'introduction d'acariens prédateurs comprennent l'importance des facteurs température et humidité. Développer de meilleures techniques de gestion du climat afin d'obtenir un équilibre entre les besoins de la plante et ceux des agents de lutte introduits contribuerait à l'établissement d'une gestion intégrée des tétranyques sous tunnels.

3.3 Modèle de simulation dynamique

Finalement, la troisième et dernière hypothèse spécifique énoncée, selon laquelle une simulation dynamique simplifiée prédisant l'évolution des populations de tétranyques en réponse à la température peut être développée à partir des données disponibles dans la

littérature a été confirmée. Ce projet a permis de mettre en commun des données sur la biologie de *Tetranychus mcdanieli* et de décrire mathématiquement la réponse à la température de certains processus biologiques (i.e. le temps de développement des immatures, la longévité des adultes, la fécondité). Bien que le modèle de simulation dynamique reste à valider avec des jeux de données indépendants de ceux utilisés pour la calibration, il permet déjà de nous éclairer sur la dynamique des tétranyques se développant sous tunnels. Le modèle de simulation, construit avec une structure simple, réussit à prédire adéquatement l'évènement clé d'un système biologique complexe, soit l'explosion des populations de tétranyques. Il nous permet de voir également l'importance de la température sur la gestion des tétranyques. D'abord, en démontrant l'intensification de la problématique en prédisant environ sept générations annuelles de tétranyques sous tunnels contrairement à quatre hors tunnels (données non montrées). Dans un deuxième temps, en démontrant l'importance des seuils de température pour la prédation. La répression effectuée par les prédateurs tôt en saison détermine l'amplitude que prendront les populations de tétranyques dans les mois suivants. Selon les prédictions de notre modèle, une moyenne de température de seulement 2°C supérieure ou inférieure peut faire une immense différence (voir **Figure 2.13**). Les résultats du modèle appuient les observations faites sur le terrain et démontre l'importance de la gestion du climat sous tunnels. Ce volet du projet est une contribution originale de la recherche pour le développement de la lutte biologique intégrée contre les tétranyques dans les framboisières sous tunnels. C'est le premier pas dans la création d'un outil de prédiction de la dynamique tétranyques : phytoséides en fonction la température et l'humidité enregistré sous tunnels.

Bibliographie

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), A. e. A. C., 2007. Profil de la culture de la framboise au Canada. Ottawa, ON, Canada, 71p p.
- Ahn, J. J., Kim, K. W. and Lee, J. H., 2010. Functional response of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) to *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on strawberry leaves. *Journal of Applied Entomology*. 134, 2: 98-104
- Amano, H. and Chant, D. A., 1977. Life-history and reproduction of two species of predacious mites, *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot and *Amblyseius andersoni* (Chant) (Acarina: Phytoseiidae) *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie*. 55, 12: 1978-1983
- Applied Bio-nomics Ltd., *Amblyseius (Neoseiulus) fallacis*; Spider mite predator. Dans: Applied Bio-nomics Ltd. Technical manual (En ligne). <http://appliedbio-nomics.com/sites/default/files/201-fallacis.pdf> (Page consultée le 15 décembre 2011)
- Auger, P., Tixier, M. S., Kreiter, S. and Fauvel, G., 1999. Factors affecting ambulatory dispersal in the predaceous mite *Neoseiulus californicus* (Acari : Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*. 23, 3: 235-250
- Baker, E. W. and Tuttle, D. M., 1994. A guide to the spider mites (Tetranychidae) of the United States. Indira Publishing House, West Bloom Field, Michigan, U.S.A, 347 p.
- Bancroft, J. S. and Margolies, D. C., 1999. An individual-based model of an acarine tritrophic system: lima bean, *Phaseolus lunatus* L., twospotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari : Tetranychidae), and *Phytoseiulus persimilis* (Acari : Phytoseiidae). *Ecological Modelling*. 123, 2-3: 161-181
- Blackwood, J. S., Schausberger, P. and Croft, B. A., 2001. Prey-stage preference in generalist and specialist phytoseiid mites (Acari : Phytoseiidae) when offered *Tetranychus urticae* (Acari : Tetranychidae) eggs and larvae. *Environmental Entomology*. 30, 6: 1103-1111
- Bounfour, M. and Tanigoshi, L. K., 2002. Predatory role of *Neoseiulus fallacis* (Acari : Phytoseiidae): Spatial and temporal dynamics in Washington red raspberry fields. *Journal of Economic Entomology*. 95, 6: 1142-1150

- Bourgeois, G., 2009. Les dynamiques des cultures et leurs bioagresseurs dans un contexte de climat variable et en évolution. Drummondville, Qc, Canada, 22 octobre 2009, 4p.
- Briere, J. F., Pracros, P., Le Roux, A. Y. and Pierre, J. S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environmental Entomology*. 28, 1: 22-29
- Bylemans, D., Janssen, C., Latet, G., Meesters, P., Peusens, G., Pitsioudis, G. and Wagelmans, G., 2003. Pest control by means of natural enemies in raspberry and red currants under plastic tunnel. Dans: S. C. Gordon and J. V. Cross Book (eds). IOBC/WPRS Bulletin, Vol. 26 (2). Dundee, Scotland, 37-44
- Cakmak, I., Janssen, A. and Sabelis, M. W., 2006. Intraguild interactions between the predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis*. *Experimental and Applied Acarology*. 38, 1: 33-46
- Cakmak, I., Janssen, A., Sabelis, M. W. and Baspinar, H., 2009. Biological control of an acarine pest by single and multiple natural enemies. *Biological Control*. 50, 1: 60-65
- Canlas, L. J., Amano, H., Ochiai, N. and Takeda, M., 2006. Biology and predation of the Japanese strain of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari : Phytoseiidae). *Systematic and Applied Acarology*. 11, 2: 141-157
- Caron, J., Laverdière, L. and Roy, M., 2000. Guide de lutte intégrée contre les tétranyques dans la production de la framboise. Horti-Protection inc., 27 p.
- Castagnoli, M. and Simoni, S., 1994. The effect of different constant humidities on egg and larvae of *Amblyseius californicus* (McGregor) (Acarina Phytoseiidae). *Redia*. 77, 2: 349-359
- Chant, D. A., 1959. Phytoseiid Mites (Acarina: Phytoseiidae). *The Canadian entomologist: Supplement* 12. 91, 166p.
- Chant, D. A. and Hansell, R. I. C., 1971. The genus *Amblyseius* (Acarina: Phytoseiidae) in Canada and Alaska. *Canadian Journal of Zoology*. 49, 703-758
- Collier, T. and Van Steenwyk, R., 2004. A critical evaluation of augmentative biological control. *Biological Control*. 31, 2: 245-256
- Coop, L. B. and Croft, B. A., 1995. *Neoseiulus fallacis*: dispersal and biological control of *Tetranychus urticae* following minimal inoculations into a strawberry field. *Experimental and Applied Acarology*. 19, 1: 31-43
- CRAAQ, 2010. Framboisier Guide de protection 2010. 26 p.

- Croft, B. A. and Brown, A. W. A., 1975. Responses of arthropod natural enemies to insecticides. *Annual Review of Entomology*. 20, 285-335
- Croft, B. A., Messing, R. H., Dunley, J. E. and 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 *Experimental and Applied Acarology*. 17, 6: 451-459
- Croft, B. A. and Croft, M. B., 1996. Intra- and interspecific predation among adult female phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae): Effects on survival and reproduction. *Environmental Entomology*. 25, 4: 853-858
- Croft, B. A., Kim, S. S. and Kim, D. I., 1996. Intra- and interspecific predation on four life stage groups by the adult females of *Metaseiulus occidentalis*, *Typhlodromus pyri*, *Neoseiulus fallacis* and *Amblyseius andersoni*. *Experimental and Applied Acarology*. 20, 435-444
- Croft, B. A. and Coop, L. B., 1998. Heat units, release rate, prey density, and plant age effects on dispersal by *Neoseiulus fallacis* (Acari : Phytoseiidae) after inoculation into strawberry. *Journal of Economic Entomology*. 91, 1: 94-100
- Croft, B. A., Monetti, L. N. and 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? *Environmental Entomology*. 27, 3: 531-538
- Croft, B. A., Luh, H. K. and Schausberger, P., 1999. Larval size relative to larval feeding, cannibalism of larvae, egg or adult female size and larval-adult setal patterns among 13 phytoseiid mite species. *Experimental & Applied Acarology*. 23, 599-610
- Croft, B. A., Pratt, P. D. and Luh, H. K., 2004. Low-density releases of *Neoseiulus fallacis* provide for rapid dispersal and control of *Tetranychus urticae* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae) on apple seedlings. *Experimental and Applied Acarology*. 33, 327-339
- De Courcy Williams, M. E., Kravar-Garde, L., Fenlon, J. S. and Sunderland, K. D., 2004. Phytoseiid mites in protected crops: the effect of humidity and food availability on egg hatch and adult life span of *Iphiseius degenerans*, *Neosiulus cucumeris*, *N. californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*. 32, 1-2: 1-13

- Doughty, C. C., Crandall, P. C. and Shanks, C. H. J., 1972. Cold injury to red raspberries and the effect of premature defoliation and mite damage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 97, 670-673
- Duthie, J. A., 1997. Models of the response of foliar parasites to the combined effects of temperature and duration of wetness. *Phytopathology*. 87, 11: 1088-1095
- Everson, P., 1980. Relative activity and functional response of *Phytoseiulus persimilis* (Acarina:Phytoseiidae) and *Tetranychus urticae* (Acarina: Tetranychidae) : effect of temperature. *Canadian Entomologist*. 112, 1: 17-24
- Feiertag-Koppen, C. C. M. and Pijnacker, L. P., 1985. Oogenesis. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). Spider mites: Their biology, natural enemies and control, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 117-128
- Force, D. C., 1967. Effect of temperature on biological control of two spotted spider mites by *Phytoseiulus persimilis*. *Journal of Economic Entomology*. 60, 5: 1308-1311
- Fraulo, A. B. and Liburd, O. E., 2007. Biological control of twospotted spider mite, *Tetranychus urticae*, with predatory mite, *Neoseiulus californicus*, in strawberries. *Experimental and Applied Acarology*. 43, 109-119
- Friese, D. D. and Gilstrap, F. E., 1982. Influence of prey availability on reproduction and prey consumption of *Phytoseiulus persimilis*, *Amblyseius californicus*, and *Metaseiulus occidentalis* (Acarina: Phytoseiidae). *International Journal of Acarology*. 8, 2: 85-89
- Gaede, K., 1992. On the water balance of *Phytoseiulus persimilis* and its ecological significance *Experimental and Applied Acarology*. 15, 3: 181-198
- Genini, M., Klay, A., Baumgartner, J., Delucchi, V. and Bailod, M., 1991. Comparative-studies on the influence of temperature and food on the development of *Amblyseius-andersoni*, *Neoseiulus-fallacis*, *Galendromus-longipilus* and *Typhlodromus-pyri* (Acari, Phytoseiidae)]. *Entomophaga*. 36, 1: 139-154
- Gerson, U., 1985. Webbing. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). Spider mites: Their biology, natural enemies and control, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 223-232
- Gerson, U. and Weintraub, P. G., 2007. Mites for the control of pests in protected cultivation. *Pest Management Science*. 63, 7: 658-676
- Gillespie, D. R., Opit, G. and Roitberg, B., 2000. Effects of temperature and relative humidity on development, reproduction, and predation in *Feltiella acarisuga* (Vallot) (Diptera : Cecidomyiidae). *Biological Control*. 17, 2: 132-138

- Gordon, S. C., Woodford, J. A. T. and Barrie, I. A., 1990. Monitoring pests of red raspberry in the United Kingdom and the possible implementation of an integrated pest management system. Dans: N. J. Bostanian, L. T. Wilson and T. J. Dennehy Book (eds). Monitoring and integrated management of arthropod pests of small fruit crops, Vol. Intercept, Andover, UK, 1-26
- Gotoh, T., Yamaguchi, K. and Mori, K., 2004. Effect of temperature on life history of the predatory mite *Amblyseius (Neoseiulus) californicus* (Acari : Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*. 32, 1-2: 15-30
- Gotoh, T. and Tsuchiya, A., 2009. Food scarcity reduces female longevity of *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*. 47, 3: 249-256
- Greco, N. M., Sanchez, N. E. and Liljestrom, 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. *Experimental and Applied Acarology*. 37, 1-2: 57-66
- Gutierrez, J., 1985. Systematics. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). Spider mites: Their biology, natural enemies and control, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 75-90
- Hajek, A. E., 2004a. Introduction to biological control. Dans: A. E. Hajek Book (eds). *Natural Enemies: An Introduction to Biological Control*, Vol. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 19-38
- Hajek, A. E., 2004b. Why use natural enemies? Dans: A. E. Hajek Book (eds). *Natural Enemies: An Introduction to Biological Control*, Vol. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2-18
- Hammamura, T., Shinkaji, N. and Ashihara, W., 1976. The relationship between temperature and developmental period and oviposition of *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acarina: Phytoseiidae). *Bull. Fruit Tree Res. Stn.* E1, 117-125
- Helle, W. and Pijnacker, L. P., 1985. Parthenogenesis, chromosomes and Sex. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 129-140
- Jandricic, S. E., Wraight, S. P., Bennett, K. C. and Sanderson, J. P., 2010. Developmental times and life table statistics of *Aulacorthum solani* (Hemiptera: Aphididae) at six constant temperatures, with recommendations on the application of temperature-dependent development models. *Environmental Entomology*. 39, 5: 1631-1642

- Janssen, A. and Sabelis, M. W., 1992. Phytoseiid life-histories, local predator-prey dynamics, and strategies for control of tetranychid mites. *Experimental and Applied Acarology*. 14, 233-250
- Janssen, A., 1999. Plants with spider-mite prey attract more predatory mites than clean plants under greenhouse conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 90, 2: 191-198
- Jeppson, L. R., Keifer, H. H. and Baker, E. W., 1975. *Mites Injurious to Economic Plants*. University of California Press, London, England, 614 p.
- Johnson, D. T., 2009. Integrated Pest Management in Fruits – Theory and Practice. Dans: R. Peshin and A. K. Dhawan Book (eds). *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*, Vol. Springer Science+Business Media B.V., 599-629
- Jung, C. L. and Croft, B. A., 2000. Survival and plant-prey finding by *Neoseiulus fallacis* (Acari : Phytoseiidae) on soil substrates after aerial dispersal. *Experimental and Applied Acarology*. 24, 8: 579-596
- Jung, C. L. and Croft, B. A., 2001. Ambulatory and aerial dispersal among specialist and generalist predatory mites (Acari : Phytoseiidae). *Environmental Entomology*. 30, 6: 1112-1118
- Kazak, C., 2008. The development, predation, and reproduction of *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari : Phytoseiidae) from Hatay fed *Tetranychus Cinnabarinus* Boisduval (Acari : Tetranychidae) larvae and protonymphs at different temperatures. *Turkish Journal of Zoology*. 32, 4: 407-413
- Kennedy, G. G. and Smitley, D. R., 1985. Dispersal. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 233-242
- Kidd, N. A. C. and Jervis, M. A., 2005. Population dynamics. Dans: M. A. Jervis Book (eds). *Insects as natural enemies: A practical perspective*, Vol. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 435-523
- Kim, D. S. and Lee, J. H., 2003. Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera : Carposinidae). *Ecological Modelling*. 162, 1-2: 145-153
- Kim, D. S. and Lee, J. H., 2010. A population model for the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae), in a Korean orchard system. *Ecological Modelling*. 221, 2: 268-280

- Kim, H., Baek, S., Kim, S., Lee, S. Y. and Lee, J. H., 2009a. Temperature-dependent development and oviposition models of *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Hemiptera: Alydidae). *Applied Entomology and Zoology*. 44, 4: 515-523
- Kim, T., Ahn, J. and Lee, J. H., 2009b. Temperature-dependent developmental model of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari, Phytoseiidae). *Journal of Applied Entomology*. 133, 4: 284-291
- Kramer, D. A. and Hain, F. P., 1989. Effect of constant-humidity and variable-humidity and temperature regimes on the survival and developmental periods of *Oligonychus ununguis* (Acarina, Tetranychidae) and *Neoseiulus fallacis* (Acarina, Phytoseiidae). *Environmental Entomology*. 18, 5: 741-746
- Lactin, D. J., Holliday, N. J., Johnson, D. L. and Craigen, R., 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. *Environmental Entomology*. 24, 1: 68-75
- Laing, J. E., 1968. Life history and life table of *Phytoseiulus persimilis*. *Acarologia* (Paris). 10, 4: 578-588
- Law, A. M., 2007. Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill Higher Education, New-York, 768 p.
- Linder, C., Mittaz, C. and Carlen, C., 2003. Biological control of *Tetranychus urticae* on plastic covered raspberries with native and introduced phytoseiids. Dans: S. C. Gordon and J. V. Cross Book (eds). IOBV/WPRS Bulletin, Vol. 26 (2). 113-118
- Logan, J. A., Wollkind, D. J., Hoyt, S. C. and Tanigoshi, L. K., 1976. Analytic model for description of temperature-dependent rate phenomena in arthropods. *Environmental Entomology*. 5, 6: 1133-1140
- Logan, J. A., 1988. Toward an expert system for development of pest simulation models. *Environmental Entomology*. 17, 2: 359-376
- Malais, M. H. and Ravensberg, W. J., 2008. Les acariens et leurs ennemis. Dans: M. H. Malais and W. J. Ravensberg Book (eds). Connaître et Reconnaître: La biologie des ravageurs des serres et de leurs ennemis naturels, Vol. 21-38
- MAPAQ and ISQ, 2007. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. 108 p.
- Mariethoz, J., Baillod, M. and Linder, C., 1994. Distribution, méthodes de contrôle et stratégies de lutte chimique et biologique contre l'acarien jaune, *Tetranychus urticae* Koch, dans les cultures de framboisiers *Revue suisse de viticulture arboriculture horticolture*. 26, 5: 315-321

- McMurtry, J. A. and Croft, B. A., 1997. Life-styles of phytoseiid mites and their role in biological control. *Annual Review of Entomology*. 42, 291-321
- Monetti, L. N. and Croft, B. A., 1997. *Neoseiulus californicus* (McGregor) and *Neoseiulus fallacis* (Garman): Larval responses to prey and humidity, nymphal feeding drive and nymphal predation on phytoseiid eggs. *Experimental and Applied Acarology*. 21, 4: 225-234
- Nielsen, G. L., 1958. Biology of the McDaniel Mite, *Tetranychus mcdanieli* McGregor in Utah. *Journal of Economic Entomology*. 51, 1: 588-592
- Nyrop, J. P., English-Loeb, G. and Roda, A., 1998. Conservation biological control of spider mites in perennial cropping systems. Dans: P. Barbosa Book (eds). *Conservation biological control*, Vol. Academic Press, San Diego, California, U.S.A., 307-333
- Opit, G. P., Roitberg, B. and Gillespie, D. R., 1997. The functional response and prey preference of *Feltiella acarisuga* (Vallot) (Diptera: Cecidomyiidae) for two of its prey: Male and female twospotted spider mites, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Canadian Entomologist*. 129, 2: 221-227
- Opit, G. P., Nechols, J. R. and Margolies, D. C., 2004. Biological control of twospotted spider mites, *Tetranychus urticae* Koch (Acari : Tetranychidae), using *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari : Phytoseiidae) on ivy geranium: assessment of predator release ratios. *Biological Control*. 29, 3: 445-452
- Overmeer, W. P. J., 1985a. Diapause. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, 95-101
- Overmeer, W. P. J., 1985b. Alternative prey and other food resources. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, 131-137
- Pratt, P. D., Monetti, L. N. and 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. *Environmental Entomology*. 27, 1: 148-153
- Pratt, P. D., Schausberger, P. and Croft, B. A., 1999. Prey-food types of *Neoseiulus fallacis* (Acari : Phytoseiidae) and literature versus experimentally derived prey-food estimates for five phytoseiid species. *Experimental and Applied Acarology*. 23, 7: 551-565

- Pritchard, A. E. and Baker, E. W., 1955. A revision of the spider mite family Tetranychidae. . Pacific Coast Entomological Society, San Francisco, California, U.S.A., p.
- Rasmy, A. H., Abdel-Rahman, H. A. and Hussein, H. E., 1991. Suitability of different mite prey for the development of the predatory mite, *Phytoseiulus persimilis*. Experimental and Applied Acarology. 11, 89-91
- Raworth, D. A., 1989. Towards the establishment of an economic threshold for the twospotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on red raspberry, *Rubus idaeus*. Acta Horticulturae. 262, 223-226
- Raworth, D. A. and Clements, S. J., 1996. Plant growth and yield of red raspberry following primocane defoliation. HortScience. 31, 920-922
- Rhodes, E. M. and Liburd, O. E., 2006. Evaluation of predatory mites and Acramite for control of twospotted spider mites in strawberries in north central Florida. Journal of Economic Entomology. 99, 4: 1291-1298
- Rhodes, E. M., Liburd, O. E., Kelts, C., Rondon, S. I. and Francis, R. R., 2006. Comparison of single and combination treatments of *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus californicus*, and Acramite (bifenazate) for control of twospotted spider mites in strawberries. Experimental and Applied Acarology. 39, 3-4: 213-225
- Roy, M., Brodeur, J. and Cloutier, C., 1999. Seasonal abundance of spider mites and their predators on red raspberry in Quebec. Environmental Entomology. 28, 735-747
- Roy, M., 2002. Étude de la prédation de *Stethorus punctillum* et d'*Amblyseius fallacis* sur les tétranyques du framboisier. Thèse de doctorat. Université Laval
- Roy, M., Brodeur, J. and Cloutier, C., 2002. Relationship between temperature and developmental rate of *Stethorus punctillum* (Coleoptera : Coccinellidae) and its prey *Tetranychus mcdanieli* (Acarina : Tetranychidae). Environmental Entomology. 31, 1: 177-187
- Roy, M., Brodeur, J. and Cloutier, C., 2003a. Effect of temperature on intrinsic rates of natural increase ($r(m)$) of a coccinellid and its spider mite prey. Biocontrol. 48, 1: 57-72
- Roy, M., Brodeur, J. and Cloutier, C., 2003b. Temperature and sex allocation in a spider mite. Oecologia. 135, 2: 322-326
- Roy, M., Brodeur, J. and 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). *Biological Control*. 34, 1: 47-57
- Sabelis, M. W., 1981. Biological control of two-spotted spider mites using phytoseiid predators. Part 1. *Agr. Research Reports*, # 910, Wageningen, The Netherlands, 242p.
- Sabelis, M. W., 1985. Reproductive strategies. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 265-279
- Sabelis, M. W. and Bakker, F. M., 1992. How predatory mites cope with the web of their tetranychid prey - a functional view on dorsal chaetotaxy in the Phytoseiidae. *Experimental and Applied Acarology*. 16, 3: 203-225
- Sabelis, M. W. and Afman, B. P., 1994. Synomone-induced suppression of take-off in the phytoseiid mite *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot. *Experimental & Applied Acarology*. 18, 11-12: 711-721
- Sances, F. V., Wyman, J. A. and Ting, I. P., 1979. Physiological responses to spider mite infestation on strawberries. *Environmental Entomology*. 8, 711-714
- Schausberger, P. and Croft, B. A., 1999. Predation on and discrimination between con- and heterospecific eggs among specialist and generalist phytoseiid mites (Acari : Phytoseiidae). *Environmental Entomology*. 28, 3: 523-528
- Schausberger, P. and Croft, B. A., 2000. Cannibalism and intraguild predation among phytoseiid mites: Are aggressiveness and prey preference related to diet specialization ? *Experimental and Applied Acarology*. 24, 9: 709-725
- Schausberger, P. and Walzer, A., 2001. Combined versus single species release of predaceous mites: Predator-predator interactions and pest suppression. *Biological Control*. 20, 3: 269-278
- Schulten, G. G. M., 1985a. Pseudo-Arrhenotoky. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, 67-71
- Schulten, G. G. M., 1985b. Mating. Dans: H. W. and M. W. Sabelis Book (eds). *Spider mites: Their biology, natural enemies and control*, Vol. 1B. Elsevier, Amsterdam, 55-65
- Shanks, C. H., Antonelli, A. L. and Congdon, B. D., 1992. Effect of pesticides on twospotted spider-mite (Acari: Tetranychidae) populations on red raspberries in western Washington. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 38, 3: 159-165

- Shipp, J. L. and Clarke, D. N., 2002. Decision tools for integrated pest management Dans: R. Albajes, M. Lodovica Gullino, J. C. van Lenteren and Y. Elad Book (eds). Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops, Vol. 168-182
- Skirvin, D. and Fenlon, J., 2003a. Of mites and movement: the effects of plant connectedness and temperature on movement of *Phytoseiulus persimilis*. Biological Control. 27, 3: 242-250
- Skirvin, D. J. and Fenlon, J. S., 2003b. The effect of temperature on the functional response of *Phytoseiulus persimilis* (Acari : Phytoseiidae). Experimental and Applied Acarology. 31, 1-2: 37-49
- Smith, J. C. and Newsom, L. D., 1970. Laboratory evaluation of *Amblyseius fallacis* as a predator of Tetranychid mites. Journal of Economic Entomology. 63, 6: 1876-1878
- Southwood, T. R. E. and Henderson, P. A., 2000. Ecological methods. Kluwer Academic Press, London, Royaume-Uni, 575 p.
- Stenseth, C., 1979. Effect of temperature and humidity on the development of *Phytoseiulus persimilis* and its ability to regulate populations of *Tetranychus urticae* (Acarina, Phytoseiidae, Tetranychidae). Entomophaga. 24, 3: 311-317
- Strong, W. B. and Croft, B. A., 1995. Inoculative release of phytoseiid mites (Acarina, Phytoseiidae) into the rapidly expanding canopy of hops for control of *Tetranychus urticae* (Acarina, Tetranychidae). Environmental Entomology. 24, 2: 446-453
- Strong, W. B. and Croft, B. A., 1996. Release strategies and cultural modifications for biological control of twospotted spider mite by *Neosieulus fallacis* (Acari: Tetranychidae, Phytoseiidae) on hops. Environmental Entomology. 25, 2: 529-535
- Tomczyk, A. and Kropczynska, D., 1985. Effects of the host plants. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). Spider mites: Their biology, natural enemies and control, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 317-330
- van Lenteren, J. C. and Woets, J., 1988. Biological and integrated pest-control in greenhouses. Annual Review of Entomology. 33, 239-269
- Vanas, V., Enigl, M., Walzer, A. and Schausberger, P., 2006. The predatory mite *Phytoseiulus persimilis* adjusts patch-leaving to own and progeny prey needs. Experimental and Applied Acarology. 39, 1: 1-11
- Veerman, A., 1985. Diapause. Dans: W. Helle and M. W. Sabelis Book (eds). Spider mites: Their biology, natural enemies and control, Vol. 1A. Elsevier, Amsterdam, 279-316

- Walzer, A. and Schausberger, P., 1999. Cannibalism and interspecific predation in the phytoseiid mites *Phytoseiulus persimilis* and *Neoseiulus californicus*: predation rates and effects on reproduction and juvenile development. *Biocontrol*. 43, 4: 457-468
- Walzer, A., Castagnoli, M., Simoni, S., Liguori, M., Palevsky, E. and Schausberger, P., 2007. Intraspecific variation in humidity susceptibility of the predatory mite *Neoseiulus californicus*: Survival, development and reproduction. *Biological Control*. 41, 1: 42-52
- Walzer, A., Moder, K. and Schausberger, P., 2009. Spatiotemporal within-plant distribution of the spider mite *Tetranychus urticae* and associated specialist and generalist predators. *Bulletin of Entomological Research*. 99, 5: 457-466
- Walzer, A. and Schausberger, P., 2011. Threat-sensitive anti-intraguild predation behaviour: maternal strategies to reduce offspring predation risk in mites. *Animal Behavior*. 81, 1: 177-184
- Weintraub, P. and Palevsky, E., 2008. Evaluation of the predatory mite, *Neoseiulus californicus*, for spider mite control on greenhouse sweet pepper under hot arid field conditions. *Experimental and Applied Acarology*. 45, 1-2: 29-37
- Wildung, D. and Johnson, P., 2004. The high tunnel environment - internal and external. Dans: Book (eds). Minnesota high tunnel production manual for commercial growers, Vol. 13
- Wood, L., Raworth, D. A. and Mackauer, M., 1994. Biological control of the two-spotted spider mite in raspberries with the predator mite, *Phytoseiulus persimilis*. *Journal of Entomology Society of British Columbia*. 91, December: 59-62
- Yano, S. and Osakabe, M., 2009. Do spider mite-infested plants and spider mite trails attract predatory mites? *Ecological Research*. 24, 6: 1173-1178
- Zhang, Z.-Q., 2003. Mites of greenhouses. CABI Publishing, Cambridge, MA. USA, 235 p.
- Zhang, Z. Q. and Sanderson, J. P., 1997. Patterns, mechanisms and spatial scale of aggregation in generalist and specialist predatory mites (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*. 21, 6-7: 393-404