

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DE DEUX NOUVEAUX AGENTS DE LUTTE BIOLOGIQUE
CONTRE LE PUCERON DE LA DIGITALE À BASSE TEMPÉRATURE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
YAMILIE FRANCOEUR-PIN

MAI 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à débuter mon mémoire en remerciant ceux et celles qui ont contribué à mon cheminement durant ma maîtrise. Quand j'ai débuté mon projet de recherche, je ne savais pas du tout ce qui m'attendais. Non seulement ais-je fais plusieurs belles rencontres, mais j'ai aussi tissé des liens durables avec des gens qui comme moi, se lançaient dans le monde de la biologie, à la recherche de nouvelles découvertes et de nouvelles passions. Ce projet m'a aussi permis de développer certaines qualités personnelles et compétences qui me suivront pour le reste de ma carrière. J'ai également développé mes habiletés en couture, bricolage et menuiserie (ce dont je ne m'attendais pas du tout).

Maman et Dad, merci pour vos encouragements et votre soutien émotionnel lorsque je suis déménagée à Montréal. Akia, merci d'avoir été mon cobaye de présentation orale et de m'avoir écouté pendant des heures parler d'insectes. Merrick, merci de m'avoir appuyé durant mes hauts et mes bas puis de m'avoir convaincue de ne jamais abandonner. Je vous aime et ceci n'aurait jamais été possible sans vous.

J'aimerais remercier mon directeur de recherche, Éric Lucas pour son encadrement, écoute, aide, et temps et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Merci d'avoir été mon mentor, de m'avoir poussé à toujours penser plus loin et de m'avoir accueilli si chaleureusement parmi une équipe exceptionnelle. Marc, merci pour toute ton aide et ta patience lorsque j'avais des questions. Je n'ai jamais rencontré quelqu'un qui est si prêt à aider les gens de son entourage. J'aimerais également remercier Geneviève Labrie et Client Kelly qui ont pris le temps de lire mon proposé de recherche et pour

leurs avis et conseils. Merci également à toute l'équipe du laboratoire de lutte biologique pour votre aide et encouragements au cours de la réalisation de ce projet.

DÉDICACE

À ma mère Julie et à mon père Marcel, ma
plus profonde reconnaissance.

TABLES DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vivii
LISTE DES TABLEAUX.....	vvii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	ixx
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I ÉVALUATION DE DEUX AGENTS DE LUTTE BIOLOGIQUE POTENTIELS CONTRE LE PUCERON DE LA DIGITALE À BASSE TEMPÉRATURE.....	31
1.1 Introduction	32
1.2 Materials and methods.....	36
1.2.1 Insect rearing	36
1.2.2 Experiment on active flight capacity at low temperatures	38
1.2.3 Experiment on oviposition at low temperatures	39
1.2.4 Experiment on larval voracity at low temperatures	40
1.2.5 Statistical analyses	41
1.3 Results	42
1.3.1 Active flight capacity at low temperature	42
1.3.2 Oviposition at low temperatures	44
1.3.3 Larval voracity at low temperatures.....	46
1.4 Discussion.....	48
1.5 Acknowledgements.....	53
CHAPITRE II LUTTE BIOLOGIQUE DU PUCERON DE LA DIGITALE À L'AIDE D'UN SYSTÈME DE PLANTE RÉSERVOIR AVEC <i>EUPEODES</i> <i>AMERICANUS</i> (DIPTERA : SYRPHIDAE) DANS DES SERRES EXPÉRIMENTALES ET COMMERCIALES.....	54

2.1	Introduction.....	55
2.2	Materials and methods.....	58
2.2.1	Insect rearing	58
2.2.2	Evaluation of foxglove aphid control in experimental greenhouse	58
2.2.3	Evaluation of foxglove aphid control in commercial greenhouse	60
2.2.4	Statistical analyses	61
2.3	Results	62
2.3.1	Evaluation of foxglove aphid control in experimental greenhouse	62
2.3.2	Evaluation of foxglove aphids control in commercial greenhouse	66
2.4	Discussion.....	68
2.5	Acknowledgements.....	73
	CONCLUSION	74
	APPENDICE A ARTICLE PUBLIÉ À L'ORGANISATION INTERNATIONALE DE LUTTE BIOLOGIQUE (OILB)	78
	RÉFÉRENCES.....	85

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Pourcentage d'individus ayant démontré un vol actif pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C.....	39
1.1 Délai moyen avant d'observer un vol actif pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C	39
1.2 Pourcentage de femelles ayant pondus des œufs sur une période de 7 jours pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C.....	41
1.3 Nombre moyen d'œufs pondus sur une période de 7 jours par l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C.....	42
1.3 Nombre moyen d'œufs pondus sur une période de 7 et 14 jours par l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C	42
1.4 Consommation moyenne journalière de pucerons pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C.....	44
1.4 Consommation moyenne totale de pucerons pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C	44
2.1 Évaluation du contrôle du puceron de la digitale en serre expérimentale...	58
2.2 Pentes de régression pour les blocs et traitements des tests en serre expérimentale.....	60
2.3 Évaluation du contrôle du puceron de la digitale en serre commerciale....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.0 Seuils d'activité thermique pour le puceron de la digitale et les différents auxiliaires utilisés en lutte biologique	18

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

CM Centimètre

TM Marque

°C Degré Celsius

L Lumière

O Obscurité

® Marque déposée

RÉSUMÉ

Au fil des années, il y a une augmentation de la demande chez les consommateurs canadiens pour des produits cultivés de manière plus équitable et sans résidus d'insecticides. C'est pourquoi des outils plus écologiques de gestion des problèmes d'insectes nuisibles en milieu agricole tels que la lutte intégrée, ou la lutte biologique, sont employés. Un des ravageurs les plus importants en serre maraîchère en Amérique du Nord est le puceron de la digitale, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera : Aphididae). Ce puceron se reproduit très bien à faibles températures et présentement, seule la lutte chimique est utilisée puisqu'aucun agent de lutte biologique efficace à basses températures n'est disponible commercialement. Ce projet a pour but d'évaluer deux nouveaux auxiliaires de lutte biologique, la chamémyie glyphinivore, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera : Chamaemyiidae) et l'eupéode d'Amérique, *Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann) (Diptera : Syrphidae) contre le puceron de la digitale à faibles températures. L'étude comprenait un volet de laboratoire et un volet de validation en serre.

En laboratoire, suite à l'évaluation du vol des adultes, de la ponte et de la consommation larvaire des pucerons, à 12°C, 15°C et 18°C chez ces deux agents de lutte biologique, l'eupéode s'est avéré plus performant. Il a donc été sélectionné pour la partie serre. En serres, l'eupéode a été testé au sein d'un système de plante-réservoir pour lutter contre le puceron de la digitale à basse température. Le syrphe a utilisé les systèmes de plante réservoir comme ressources nutritives et se reproduisait adéquatement sur celles-cis. Les plants de poivrons vert infestés par des pucerons de la digitale et exposés aux syrphes démontrent un nombre significativement plus bas de pucerons à la fin des tests comparativement aux témoins (innaccessibles au prédateur). Dans les serres commerciales, les adultes qui émergeaient des systèmes de plante réservoir étaient capables de localiser les plantes infestées, de pondre et de contrôler efficacement les populations de pucerons après 6 semaines. Au final, les résultats ont démontré que l'eupéode d'Amérique possède un très bon potentiel de contrôle de populations du puceron de la digitale en serre maraîchère.

Mots clés : lutte biologique, faibles températures, système de plante réservoir, serre maraîchère

INTRODUCTION

Il y a de plus en plus de préoccupations pour le devenir environnemental des produits chimiques utilisés contre les ravageurs en culture (Giroux, 2015). Certaines des préoccupations liées à l'utilisation des insecticides viennent du danger qu'ils constituent pour la santé et pour l'environnement ainsi que du développement de résistance chez les organismes nuisibles (Bass et Jones, 2018). De plus, ils causent une perte de biodiversité, diminuent la qualité de l'eau et contribuent à l'émission de gaz à effets de serre (Hamilton *et al.*, 2015). D'ailleurs, au Québec, le Ministère du développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques a mis en place une Stratégie québécoise sur les pesticides de 2015-2018 qui vise à protéger la santé de la population, les pollinisateurs et l'environnement (Ministère du développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015). C'est pourquoi des outils plus écologiques parmi la lutte intégrée, tel que la lutte biologique, sont employés pour y arriver.

Le but de ce projet de recherche est d'évaluer deux nouveaux agents de lutte biologique; la chamémyie glyphinivore, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera : Chamaemyiidae) et l'eupéode d'Amérique, *Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann) (Diptera : Syrphidae) contre le puceron de la digitale, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera : Aphididae) à basse température en serre maraîchère. Le puceron de la digitale (*A. solani*) a récemment changé de statut de ravageur occasionnel à celui de ravageur principal en Amérique du Nord et au Royaume-Uni (Jandricic *et al.*, 2014a). Ce puceron se reproduit efficacement à basse température et présentement, aucun agent de lutte commercialement disponible n'est efficace à ces

températures. Les plus grandes conséquences liées aux pucerons en horticulture , outre les dommages directs, sont la transmission de virus et les dommages esthétiques qu'ils causent aux plantes en serre (Yovkova *et al.*, 2013).

Les agents de lutte biologique comme la chamémyie glyphinivore (*L. glyphinivora*) et l'eupéode d'Amérique (*E. americanus*) serviraient à remplacer l'utilisation d'agents chimiques pour la répression du puceron de la digitale. Le recours aux traitements chimiques s'avère parfois inutile puisque les produits pulvérisés n'atteignent pas toujours les lieux utilisés par les ravageurs, tel que le dessous des feuilles et les feuilles au bas des plantes (Jandricic *et al.*, 2014a). De plus, l'utilisation conjointe d'agents de contrôle biologique et d'insecticides peut s'avérer impossible puisque les insecticides sont fréquemment nocifs pour l'agent de lutte et ne sont pas toujours spécifiques (Sanchez *et al.*, 2007).

Un des problèmes liés à la répression de ce puceron est qu'il se développe bien à des températures plus faibles que 20°C (Jandricic *et al.* 2014a) et est bien adapté à des températures allant de 16-25°C (Silva *et al.*, 2015). En fait, sa fécondité est maximale entre 10°C et 20°C et la lutte biologique est alors plus difficile puisqu'aucun agent de lutte biologique commercial n'est efficace à ces températures (Jandricic *et al.*, 2010). De plus, le puceron de la digitale est très difficile à gérer puisque même en petits nombres, il peut faire de grands dommages directs et indirects aux plantes en serre maraîchère. Ce secteur économique au Canada, représente des ventes de 2 milliards (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013).

Il y a un intérêt à établir l'efficacité de ces prédateurs contre des ravageurs mais il est aussi très important d'augmenter nos connaissances fondamentales sur la biologie, les interactions écologiques, le comportement et le cycle de vie de l'eupéode d'Amérique et de la chamémyie glyphinivore. Il serait intéressant de les étudier en tant que

potentiels agents de lutte en serre maraîchère puisque ces espèces sont très peu connues et il manque un grand nombre d'informations concernant leur reproduction, leur comportement de préation et leur écologie. Il serait avantageux d'établir si la chamémyie glyphinivore et l'eupéode d'Amérique sont des auxiliaires de lutte biologique efficaces contre le puceron de la digitale à de basses températures.

Pour ce faire, le vol actif des adultes, la ponte et la voracité des larves seront évalués à basses températures. Il y a un intérêt certain à évaluer ces caractères puisque selon nous, ils déterminent en grande partie l'impact et l'efficacité d'un agent de lutte biologique pour le contrôle de populations de ravageurs en serres. Le vol actif a été évalué afin de déterminer la capacité de ces prédateurs à se déplacer en culture, la ponte afin de mesurer la capacité de reproduction et de localisation de populations de ravageurs et la voracité afin de déterminer la capacité de contrôle de populations de pucerons. En ce qui a trait aux méthodes d'élevage de la chamémyie glyphinivore, il n'y a pas actuellement de diète artificielle connue et peu d'informations concernant la procédure d'élevage spécifique sont disponibles (Grubin *et al.*, 2011). En élevant un nombre élevé d'individus de cette espèce en laboratoire afin de faire des tests, ceci permettrait de contribuer au manque de données de la littérature. Enfin, ce projet apportera des connaissances utiles au domaine de la lutte biologique puisque peu de recherches se sont concentrées sur le contrôle du puceron de la digitale à faibles températures (Jandricic, 2013).

La lutte biologique en serre est basée sur l'introduction récurrente d'ennemis naturels et une façon de réduire les coûts est l'utilisation de plantes réservoir. Au fil des années, il y a une plus grande demande au Canada chez les consommateurs de produits cultivés de manière plus équitable et sans résidus d'insecticides (Louden et MacRae, 2010). C'est pourquoi il y a un intérêt à évaluer l'utilisation d'une plante réservoir (une plante autre que celle en culture avec des pucerons autres que ceux retrouvés en culture qui

serviront de proies alternatives aux prédateurs introduits en serre) puisque ce système augmente la productivité des cultures et l'efficacité de la lutte biologique contre les ravageurs (Parolin *et al.*, 2012). Il serait avantageux de tester ce système contre le puceron de la digitale, soit avec l'eupéode d'Amérique et/ou la chamémyie glyphinivore; chose qui n'a pas encore été faite à basse température. Un des bénéfices majeurs liés à l'utilisation des systèmes de plante réservoir est que l'introduction des ennemis naturels du puceron n'a pas besoin d'être répétée et ceci devient intéressant au niveau économique (Frank, 2009). Finalement, ces plantes serviraient d'abri ou de ressources alternatives pour l'agent de lutte utilisé en serriculture (Parolin *et al.*, 2012).

1.1 État des connaissances

1.1.1. Lutte biologique

La lutte biologique fait partie des méthodes parfois utilisées dans les programmes de lutte intégrée, un système de sélection pour des tactiques de contrôle de ravageurs qui prend en compte l'intérêt et l'impact sur les producteurs, la société et l'environnement (Eilenberg *et al.*, 2001). Ce contrôle se fait en utilisant des prédateurs, des parasitoïdes, des pathogènes ou des micro-organismes (Richard et Boivin, 1994). Par exemple, des bactéries, champignons, virus, nématodes, arthropodes et vertébrés de toutes sortes peuvent être utilisés comme auxiliaires de lutte (Huffaker, 2012). Ces agents de lutte biologique sont utilisés non pour éradiquer, mais pour contrôler des populations de ravageurs en culture, soit les maintenir sous des niveaux de dommage économiques

(Alberta Agriculture and Rural Development, 2002). Dans notre cas, des insectes prédateurs sont utilisés en tant qu'antagonistes pour combattre des ravageurs.

Certains des avantages de la lutte biologique portent sur le fait que cette méthode est capable de diminuer des populations de ravageurs résistants aux insecticides, de minimiser l'utilisation de pesticides et d'augmenter la biodiversité (Bale *et al.*, 2008). De plus, la lutte biologique contribue à la protection de la faune et de la flore de plusieurs écosystèmes (Van Driesche *et al.*, 2010). Il est aussi très peu probable qu'un ravageur développe une résistance à un auxiliaire de lutte et le contrôle biologique peut s'auto-perpétuer sur de longues périodes de temps (Bale *et al.*, 2008).

En ce qui concerne les inconvénients, la lutte biologique peut prendre plus de temps à réduire une population de ravageurs que les pesticides (par exemple des organismes parasités par un agent de lutte peuvent prendre plusieurs jours avant de mourir) et il est fréquent que les prédateurs requièrent une certaine période de temps avant d'établir un niveau économique de contrôle des ravageurs (Bale *et al.*, 2008). Une autre limitation vient du fait que parfois, certains auxiliaires de lutte ne sont pas disponibles pour le contrôle d'espèces exotiques envahissantes ou que les agents de lutte manquent de spécificité quant aux organismes visés (Van Driesche *et al.*, 2010). De plus, des lâchers répétés d'ennemis naturels et/ou l'utilisation de méthodes additionnelles peuvent être requis pour atteindre un niveau adéquat de contrôle biologique, par exemple l'utilisation de barrières physiques ou de substances sémiochimiques (ex : phéromones) (Bale *et al.*, 2008).

Il est important de noter qu'il existe d'autres méthodes de contrôle de ravageurs, tel que le relâchement de mâles stériles et le relâchement de nématodes qui rendent les femelles stériles (Huffaker, 2012). En lutte biologique, nous retrouvons des stratégies telles que la lutte biologique classique (introduction d'une espèce exotique afin de

réguler à long terme les populations d'un ravageur exotique) et conservative (protection et favorisation d'ennemis naturels présents) mais également celles que l'on caractérise comme inoculative et inondative (Eilenberg *et al.*, 2001), qui sont décrites ci-dessous.

1.1.1.1 Lutte biologique inoculative

En lutte biologique inoculative, des lâchers réguliers de prédateurs ou de parasitoïdes en agriculture sont effectués afin de contrôler le ravageur cible. En serre, le contrôle biologique par inoculation se fait souvent avec des ressources nutritives alternatives pour l'ennemi naturel et il doit y avoir des relâchements subséquents (Van Alfen, 2014). Le succès de la lutte contre le ravageur est basé sur le taux de reproduction du prédateur et sur sa capacité à réduire le nombre de ravageurs (Eilenberg *et al.*, 2001). Il est important de noter que ce type de contrôle biologique est une méthode à long terme et qui est aussi utilisée comme traitement préventif en culture ou lorsque la densité de ravageurs est encore faible (Huang *et al.*, 2011). Pour ce projet de recherche, puisqu'il y aura utilisation d'un système de plante réservoir et d'introduction d'agents de contrôle biologique, ce serait ce genre de lutte qui sera employée. Les ressources nutritives alternatives qui seront disponibles aux prédateurs seront les pucerons céréaliers introduits avec le système de plante réservoir. Afin qu'il y ait un contrôle efficace des populations de ravageurs, les ennemis naturels doivent être capables de s'établir en culture, de pondre et de démontrer une voracité suffisante.

1.1.1.2 Lutte biologique inondative

En lutte inondative, on effectue un lâcher de masse de prédateurs ou de parasitoïdes en culture contre les ravageurs dans le but d'obtenir des effets immédiats, où le nombre d'individus introduits diminuera avec le temps (Huffaker, 2012). Le succès de cette méthode ne dépend pas du succès de la progéniture du prédateur mais de la population initialement introduite en culture (Eilenberg *et al.*, 2001). Pour la lutte biologique inondative, il n'y a pas d'attentes de contrôle de ravageurs à long terme; c'est plutôt une méthode curative immédiate à court terme (van Lenteren, 2012). Cette approche est valorisée pour certaines cultures de haute valeur économique telles que les plantes maraîchères comme les orchidées, les poinsettias et les bégonias (Huang *et al.*, 2011).

1.1.2 Agents de lutte contre les ravageurs

Les agents de lutte biologique contre les ravageurs peuvent être des prédateurs, des parasitoïdes ou des pathogènes (Huffaker, 2012). Les prédateurs peuvent tuer et consommer les stades œufs, larvaires ou adultes de leurs proies (Méthodes alternatives de protection des pommiers, 2013). Il existe des prédateurs dont tous les stades sont prédateurs et d'autres que seulement les larves le sont. Une caractéristique qui fait en sorte qu'un prédateur est un bon agent de lutte est sa capacité à détecter des proies ou des colonies de proies et de pondre ses œufs près de ces colonies et ce, surtout si les larves sont peu mobiles (Sentis *et al.*, 2012). De plus, de bons agents possèdent des taux élevés de recherche de proies grâce à une bonne capacité de vol (Almohamad *et al.*, 2009) et une bonne voracité (Beltrà *et al.*, 2018). Aussi, un prédateur qui répond à des populations croissantes de pucerons et qui pond des œufs en conséquence (réponse

numérique reproductive) est considéré comme étant idéal pour réguler les populations de ravageurs avant qu'elles atteignent des niveaux économiquement importants (Hamilton *et al.*, 2015; Almohamad *et al.*, 2009). Finalement, un bon auxiliaire de lutte est capable de compléter son cycle vital dans l'environnement où il est introduit et ne fait pas de dommages aux plantes en culture que l'on vise à protéger (Huffaker, 2012).

1.1.3 Effet de la température sur le contrôle des ravageurs

Puisque les insectes sont poikilothermes, leur développement, activité, survie et reproduction dépendent de la température (Régnière *et al.*, 2012). Leur taux de développement est dicté par la vitesse de leur métabolisme, qui à son tour varie en fonction de la température (Logan *et al.*, 2006). Afin de comprendre le cycle de vie des organismes poikilothermes comme les insectes, il est important de prendre en compte le seuil minimal de développement. Cette constante thermique est la température sous laquelle le développement s'arrête (Honěk et Kocourek, 1988). D'un autre côté, il y a aussi le seuil de température létal (températures élevées) où les enzymes sont dénaturées et où l'insecte meurt (Gillespie *et al.*, 2012). Certains insectes ne peuvent pas survivre pour de longues périodes de temps sous le seuil de température pour le développement normal. Ceci aurait un impact sur le fonctionnement adéquat de leur métabolisme, de la présence de dormance et de la diapause (Hart *et al.*, 1997). Le cycle de vie est affecté par la température, de sorte qu'à basses températures, le développement des insectes ralentit; de même façon qu'à des températures plus élevées, le développement sera accéléré (Hong et Hung, 2010) et peut donc causer par exemple une éclosion précoce des œufs (Logan *et al.*, 2006). Ce phénomène a des implications importantes au niveau des interactions entre les proies et les prédateurs. S'il y a une

progression plus rapide entre chaque phase du développement, les ravageurs passeront plus vite au stade adulte, et ceci pourrait mener à une augmentation de la période de reproduction et d'évasion d'événements de prédation (Logan *et al.*, 2006). De plus, la stratégie de ponte des prédateurs est un aspect primordial de la lutte biologique et la température est un facteur abiotique qui affecte le comportement de ponte des femelles (Sentis *et al.*, 2008). De la même manière, la voracité des larves est très sensible aux conditions environnementales et dépend de la température (Tenhumberg et Poehling, 1995; Hopper *et al.*, 2011). En effet, il a été démontré que la température peut affecter la phénologie de la proie et du prédateur, ainsi que leur activité journalière. Ceci étant dit, une variation de température va affecter le temps de recherche et de manipulation des prédateurs faisant en sorte que le taux de prédation sera affecté lorsque les températures sont plus froides (Logan *et al.*, 2006). Ainsi, l'adaptabilité des prédateurs à la température est l'un des facteurs clé du succès en lutte biologique (Silva *et al.*, 2015).

Enfin, le concept de degré-jours est un outil qui aide à étudier la croissance des insectes, qui dépend de l'accumulation quotidienne de chaleur et de la température (Wilson et Barnett, 1983). La valeur de degré-jour pour un insecte donné est obtenue en soustrayant le seuil thermique de développement (ou la température de base minimale) de la température moyenne journalière. Les valeurs de degrés-jours sont ensuite accumulées au fil des journées à partir du moment où l'insecte passe d'un stade à l'autre, de manière à prédire son temps de développement (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 2009).

1.1.4 Plante réservoir

Tout d'abord, un système de plante réservoir, aussi connu comme plante de biocontrôle ou plante relais ou système d'élevage ouvert («open rearing system»), est caractérisé par l'utilisation d'une plante non cultivée infestée par un herbivore qui n'est pas un ravageur de la culture principale, puis d'un ennemi naturel capable d'attaquer l'herbivore et aussi un ravageur de la culture (Parolin *et al.*, 2014). Ainsi, les composantes de ce système sont : un candidat végétal alternatif, une proie animale alternative, un agent de lutte biologique.

1.1.4.1 Le candidat végétal alternatif

La base d'un système de plante réservoir est la ressource végétale alternative. Cette plante ne doit pas être la même que celles qui sont cultivées en serre maraîchère (les plantes à protéger) et ne doit pas entrer en compétition avec celles-ci pour des ressources nutritives ou pour la pollinisation (Parolin *et al.*, 2014) . Un système de plante réservoir visant la réduction de populations de pucerons possède généralement une plante céréalière tel que le blé ou l'orge (Frank, 2009). Une plante avec une architecture plus simple augmente le succès de l'établissement du prédateur en serre. De plus, moins elle a de trichomes, moins elle aura de chances d'interférer avec la ponte, la locomotion et l'alimentation des agents de lutte biologique (Parolin *et al.*, 2012). De plus, une bonne plante réservoir est généraliste en termes de sol, tolérante à des conditions sous-optimales et n'est pas facilement détruite par un grand nombre de ravageurs (Parolin *et al.*, 2014).

Les premiers systèmes de plantes réservoir furent étudiés en 1970 par Starý, l'ancêtre des plantes réservoir, comme composante de lutte biologique en serre (Huang *et al.*,

2011). La plante réservoir a été utilisée afin de réduire des populations de puceron vert du pêcher (*Myzus persicae* Sulzer) en introduisant le parasitoïde *Diaeretiella rapae* (McIntosh) (Hymenoptera : Braconidae) avec une plante du genre *Brassica* infestée par le puceron cendré du chou, *Brevicoryne brassicae* (L.) (Homoptera : Aphididae) (Huang et al., 2011). L'objectif des systèmes de plantes réservoirs est de maintenir une population d'ennemis naturels qui aide à la suppression de ravageurs au sein d'une culture (Frank, 2009). Comparativement aux stratégies de lutte biologique augmentatives qui requièrent plusieurs lâchers de prédateurs espacés dans le temps, les systèmes de plantes réservoir sont plutôt efficaces à long terme (Avery et al., 2014). Ces systèmes ont été utilisés afin de supporter 19 espèces d'ennemis naturels visant 11 espèces de ravageurs (Frank, 2009). La plupart des plantes réservoir sont utilisées en serriculture (90%) dont 12% de celles-ci ont été développées pour les serres maraîchères (Huang et al., 2011). Plusieurs recherches ont démontré que les populations de pucerons sont plus faibles dans les serres contenant des systèmes de plante réservoir comparativement aux serres n'en ayant pas (Frank, 2009).

Pour ce projet de recherche, l'orge sera utilisée en tant que candidat végétal alternatif. Des recherches ont démontré que l'orge est la plante céréalière de premier choix puisqu'elle augmente par exemple la reproduction des parasitoïdes tels qu'*Aphidius* (Payton Miller et Rebek, 2018). De plus, avec des pré-tests effectués en laboratoire, l'eupéode d'Amérique pond sur l'orge en présence du puceron du merisier à grappes (*Rhopalosiphum padi* L.).

1.1.4.2 La proie animale alternative

L'herbivore utilisé pour le système de plante réservoir n'est pas un ravageur des plantes à protéger en serre et sert de ressource alternative à l'agent de lutte biologique en culture, afin qu'il puisse survivre et se reproduire sur de longues périodes de temps (Frank, 2009). Le candidat choisi comme source proie alternative devrait être indigène, attirant pour le prédateur et ne devrait pas avoir d'effets néfastes sur le comportement de l'ennemi naturel (Huang *et al.*, 2011). En fait, des recherches ont démontré que des pucerons céréaliers tels que le puceron du pois (*Acyrtosiphon pisum* Harris), le puceron du maïs (*Rhopalosiphum maidis* Fitch) et le puceron du blé (*Sitobion avenae* Fabricius) en tant que candidats ravageurs alternatifs pour les systèmes de plante réservoir contribuent à la lutte contre le puceron de la digitale en serre (Ohta et Honda, 2010). Ces pucerons aident à l'établissement de populations de prédateurs en culture avant même l'apparition de ravageurs puisqu'ils servent de ressources alternatives lorsque la population de phytophages est encore trop faible (Jandricic *et al.*, 2014).

1.1.4.3 L'agent de lutte biologique

Les agents de lutte biologique qui sont introduits avec le système de plante réservoir sont des prédateurs ou parasitoïde des proies alternatives de la plante réservoir (pucerons céréaliers) et également des ravageurs de la plante cultivée en serre (dans notre cas le puceron de la digitale). Ces organismes sont évidemment bénéfiques, à condition qu'ils n'affectent pas les fleurs, les fruits ou les parties économiquement importantes de la plante. En donnant une source alternative de proies aux prédateurs, ceci leur permet de s'établir au sein de la culture de plantes maraîchères avant même l'arrivée des ravageurs (Landis *et al.*, 2000). Les prédateurs utilisés dans notre études seront décrit dans la section 2.

1.1.4.4 Ressources additionnelles

Les plantes comme l’alyssum (*Lobularia maritima* (L.) Desv.) sont source de nectar et de pollen pour les prédateurs et parasitoïdes. Une étude effectuée par Hogg *et al.* a démontré que cette plante attirait de manière fiable les syrphes et qu’elle avait la plus longue période de floraison parmi d’autres plantes de soutien, telles que la moutarde, le chou frisé et la roquette. De plus, les fleurs ont des corolles courtes ce qui facilite l’accès au nectar (Hogg *et al.*, 2011). Une plante en fleurs aide les agents de lutte biologique car le nectar sert de source d’énergie pour leur vol puissant et le pollen permet la maturation des organes reproducteurs chez le mâle et la femelle (Rebek *et al.*, 2005). Cette plante aiderait au développement de l’agent de lutte (Huang *et al.*, 2011) et pourrait peut-être aussi servir de lieu d’oviposition pour le prédateur. Des recherches ont démontré que l’alyssum est une espèce de plante qui se comporte comme une vivace, est une bonne compétitrice contre les mauvaises herbes, puis est une bonne source de pollen et de nectar pour les prédateurs en serriculture (Landis *et al.*, 2000). Des expériences faites avec des plants d’alyssum comme outil en lutte intégrée démontrent que des populations de syrphes se nourrissent activement de cette plante, menant à une augmentation de la ponte chez ces organismes (Gillespie *et al.*, 2011). L’utilisation de cette plante aidera à supporter les populations du prédateur choisi et ainsi à optimiser le contrôle des ravageurs (Landis *et al.*, 2000).

1.1.4.5 Avantages d’un système de plante réservoir

Un système de plante réservoir sera utilisé afin que les larves du prédateur choisi présentes sur la plante céréalière puissent se disperser en serriculture. L'avantage de leur évaluation en serriculture est qu'ils ont le potentiel d'être un moyen moins coûteux et efficace de contrôle de ravageurs (Frank, 2009). Les bénéfices qui viennent avec l'utilisation de système de plante réservoir sont nombreux. Des recherches ont démontré que leur coût est peu élevé et qu'ils stimulent une croissance de population des agents de lutte en raison d'une source alternative de nourriture de qualité (Huang *et al.*, 2011). De plus, puisque l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore ne sont pas disponibles commercialement, l'utilisation d'une plante réservoir pourrait favoriser l'introduction de ces ennemis naturels en horticulture (Huang *et al.*, 2011). En utilisant un système de plante réservoir, il y a l'avantage de relâcher des prédateurs près de sites contenant assez de ressources. Cette approche pourrait être meilleure comparativement à la lutte inoculative et innondative où les espèces introduites doivent chercher parmi de grandes surfaces contenant de petites densités de proies (Huang *et al.*, 2011). Le moment lors duquel les ennemis naturels et les plantes réservoirs sont introduits en culture est très important : l'efficacité est maximisée s'ils sont introduits avant même que les plants à protéger soient infestés de ravageurs. Cette technique permet aux prédateurs d'établir une population assez élevée, afin qu'une fois les ravageurs présents, et ce même à faibles densités, ils puissent les contrôler (Frank, 2009). De plus, ce type de système fait en sorte que les ennemis naturels sont présents en serre à longueur d'année; il n'est donc pas nécessaire d'en racheter et d'en relâcher (Bale *et al.*, 2008). L'utilisation de système de plante réservoir est donc généralement plus avantageuse au point de vue économique en serre que la lutte biologique augmentative caractérisée par des traitements répétitifs et onéreux (Frank, 2009).

1.2 Système biologique

1.2.1 Culture et ravageur

1.2.1.1 Plante maraîchère : Poivron, *Capsicum annuum* L. (Solanales : Solanaceae)

Le poivron est une ressource d'importance économique cultivé en champ dans le sud-ouest de l'Ontario et du Québec (Richard et Boivin, 1994). En serre, le poivron est cultivé sous des conditions contrôlées de lumière, température, nutriments et d'humidité relative (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011). Pour ce projet de recherche, le poivron sera non seulement utilisé durant les expériences comme support végétal pour le puceron de la digitale, mais aussi comme support végétal de sites d'oviposition pour l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore.

1.2.1.2 Puceron de la digitale (*Aulacorthum solani* Kaltenbach)

Le secteur de production de serre horticole a parmi ses productions les fleurs annuelles, les plantes vivaces, les plants de légumes en caissettes puis les fines herbes (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 2012). Une panoplie de pratiques de contrôle de ravageurs sont adoptées en production maraîchère et ornementale pour éviter des infestations, pour la prévention, la surveillance, la suppression et pour la gestion de résistance (Richard et Boivin 1994). Certaines des pratiques préventives propres au secteur des serres maraîchères incluent la disposition des espèces sur des aires de production selon leur sensibilité aux ravageurs et l'utilisation des pièges collants ou à phéromones dès les semis (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de

l’Alimentation, 2012). Malgré ces mesures, au printemps les formes d’adultes ailées de pucerons trouvent un point d’entrée dans les serres par le système de ventilation puis établissent des colonies qui peuvent survivre à l’année longue sur les plantes en serres (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011).

Le puceron de la digitale, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera : Aphididae) est une espèce est indigène de l’Europe et a été introduite en Amérique du Nord, au Japon, puis en Corée (Jandricic *et al.*, 2010). Le puceron de la digitale fait partie de la famille des *Aphididae* et se reproduit en serre de manière parthénogénétique, possédant donc un haut potentiel de reproduction (Blackman et Easthop, 2000). La parthénogénèse est thélytoque (seulement des femelles) et ce puceron peut produire beaucoup d’individus en très peu de temps, lui permettant davantage d’exploiter les plantes (Blackman et Easthop, 2000). Des colonies de pucerons de la digitale sont capables d’atteindre de hautes densités dans des cultures de plantes maraîchères (Yovkova *et al.*, 2013). En serre, les populations sont composées uniquement de femelles qui se reproduisent en moins de 7 à 10 jours. Sur une période de 20 jours, la femelle peut donner naissance à 60-100 jeunes, dépendamment de la plante hôte (Murphy *et al.*, 2006). Au fur et à mesure qu’une colonie de puceron augmente en taille, des femelles ailées ayant un comportement de migration apparaissent puis se dispersent vers de nouvelles plantes (Blackman et Easthop, 2000). Le puceron de la digitale est un des pucerons les plus polyphages et colonise plus de 82 familles de monocotylédones et dicotylédones tel que la pomme de terre, la lettue, les fèves, le céleri et les tomates (Blackman et Easthop, 2000). En effet, une recherche a démontré qu’il est un ravageur de plantes maraîchères et qu’il est retrouvé sur 95 différentes espèces de plantes de 25 familles, dont le poivron (Jandricic *et al.*, 2014). D’ailleurs, il est retrouvé sur des plantes de grande importance économique telles que les légumes, les orchidées, les tulipes, les œillets, et les géraniums (Jandricic, 2013).

Le puceron de la digitale possède des pièces buccales de type piqueur-suceur (Richard et Boivin, 1994) et est capable de sucer la sève dans le phloème, ce qui affaiblit les plantes (Richard et Boivin, 1994). De plus, leurs sécrétions salivaires sont très toxiques et mènent à la déformation et au jaunissement des feuilles et des fruits (Sanchez *et al.*, 2007), à la nécrose de tissus puis à l'enroulement et la torsion des feuilles (Jandricic *et al.*, 2010). Un autre problème causé par les pucerons est l'exuvie qu'ils produisent lors de leur mue qui n'est pas esthétique sur des plantes maraîchères. De plus, le miellat produit supporte la croissance de fumagine qui bloque la lumière et interrompt la photosynthèse (Richard et Boivin, 1994). Finalement, ce ravageur est non seulement responsable de pertes de rendement en raison de l'affaiblissement qu'il cause chez les plantes (Richard et Boivin, 1994), mais aussi de la transmission de 45 différents virus (Jandricic *et al.*, 2010).

Pour prévenir les infestations en serre, des filets bloquant les ouvertures de ventilation sont installés aux entrées (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011). Les méthodes de prévention incluent la stérilisation de l'équipement, le nettoyage et l'élimination de résidus de récolte en fin de saison ainsi que l'élimination du matériel infesté. Pour la surveillance, il y a l'utilisation de plantes indicatrices, la surveillance régulière durant le cycle de récolte et des registres de suivi des ravageurs (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011). Les méthodes utilisées pour la suppression des ravageurs sont l'utilisation de pesticides, d'agents de contrôles biologiques et de plantes réservoir. La rotation de pesticides, l'application localisée de pesticides et l'utilisation de pesticides compatibles avec les ennemis naturels sont des techniques mises en place pour la gestion de résistance (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011). Les insecticides les plus couramment utilisés en serre horticole contre le puceron de la digitale sont des néonicotinoïdes, des azadirachtines, le pyriproxifène, puis un pymétrozine qui empêche les ravageurs d'insérer leurs stylets dans les tissus végétaux (Jandricic, 2013).

Au Québec, en serres maraîchères, plusieurs insecticides homologués sont utilisés contre le puceron en général. Certains des produits utilisés sont le dichlorvos, diméthyl 2,2-dichlorovinylphosphate (DDVP) fumigué sur les plantes à chaque 3 jours, le Endeavor 50WG appliqué par intervalle de 7 jours sur la culture ainsi que l'Intercept 60WP appliqué en bande au sol et qui possède une activité résiduelle de 6 à 8 semaines (Carrier et Toulouse, 2014).

Par contre, il y a beaucoup de controverse avec l'utilisation d'insecticides, c'est pourquoi la lutte biologique est préconisée (Huffaker, 2012). Les agents de contrôle biologiques disponibles pour le contrôle des ravageurs en serres pour les pucerons sont : les parasitoïdes tels que *Aphelinus abdominalis* Dalman (Hymenoptera : Aphelinidae), *Aphidius* spp., les prédateurs comme *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera : Cecidomyiidae), la coccinelle convergente *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville (Coleoptera : Coccinellidae), la coccinelle à deux points *Adalia bipunctata* L (Coleoptera : Coccinellidae) (Schüder et al., 2004) ainsi que les syrphes *Episyrrhus balteatus* De Geer (Diptera : Syrphidae) et *Sphaerophoria rueppellii* Wiedemann (Diptera : Syrphidae) en Europe (Agrilculture and Agri-Food Canada, 2011). Des parasitoïdes tel qu'*Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera : Braconidae) sont utilisés contre différentes espèces de pucerons mais ils ne semblent pas aussi bien contrôler des pucerons de taille plus grande tel que le puceron de la digitale (Jandricic, 2013). De plus, le parasitoïde *A. abdominalis*, un autre ennemi naturel, bien qu'efficace contre le puceron de la digitale n'est pas l'agent de choix en serre puisqu'il a un long cycle de vie comparativement aux pucerons (Jandricic, 2013) et est limité par la température (Fournier, communication personnelle, août 2015). La cécidomyie du puceron (*A. aphidimyza*) n'est pas aussi efficace en serre horticole à des températures sous 20°C (Jandricic, 2013). Des prédateurs comme les chrysopes telles que *Chrysoperla rufilabris* Burmeister ou *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera :

Chrysopidae), sont normalement utilisés pour le contrôle des pucerons, mais ils n'effectuent pas leur nymphose aussi bien dans un environnement de serres et démontrent des comportements marqués de cannibalisme (Jandricic, 2013). Enfin, il y a certains pathogènes fongiques tel que *Zoophthora occidentalis* Batko (Entomophthorales : Entomophthoraceae) et *Pandora neopahidis* Humber (Entomophthorales : Entomophthoraceae) ont un effet négatif sur la fécondité des pucerons lorsqu'ils y sont exposés (Baribeau et al., 2014) mais il resterait à confirmer si le pucerons pourraient développer une résistance. Ci-dessous un tableau incluant les différents seuils thermiques d'activités pour certains ennemis naturels de pucerons. Il est évident qu'il y a une lacune dans les agents de lutte disponibles contre ces ravageurs à basse température.

Tableau 1. Seuils d'activité thermique pour le puceron de la digitale et les différents auxiliaires utilisés en lutte biologique.

Rôle trophique	Acteur biologique	Seuil d'activité thermique
Ravageur	Puceron de la digitale (<i>Aulacorthum solani</i>)	1,09°C (De Conti <i>et al.</i> , 2011)
Prédateur	Coccinelle asiatique (<i>Harmonia axyridis</i>)	11,2°C (Koch, 2003)
Prédateur	<i>Chrysoperla carnea</i> Stephens	13°C (Entocare C.V. Wageningen, 2015)
Parasitoïde	<i>Aphidius ervi</i> Haliday	15°C (Lander <i>et al.</i> , 2004)
Prédateur	Chamémyie glyphinivore (<i>Leucopis glyphinivora</i>)	Inconnu
Prédateur	Eupéode d'Amérique (<i>Eupeodes americanus</i>)	Inconnu mais de 4-6°C pour d'autres syrphes

Malgré le fait qu'il y ait plusieurs agents de lutte biologique à notre disposition contre des ravageurs en horticulture, ils sont soit pas ou peu efficaces contre le puceron de la digitale, soit à basse température. C'est pourquoi il est crucial d'évaluer des nouveaux prédateurs potentiels tels que la chamémyie glyphinivore et l'eupéode d'Amérique comme agents en lutte intégrée contre ce puceron; chose qui n'a toujours pas été faite.

1.2.2 Système de plante réservoir

1.2.2.1 Support pour système de plante réservoir : Orge, *Hordeum vulgare* L. (Poales : Poaceae)

L'orge est l'une des céréales les plus populaires en tant que ressource végétale alternative pour les systèmes de plante réservoir (Huang et al. 2011). Cette plante céréalier servira de support végétal pour le puceron bicolore des céréales et pour le prédateur le plus performant à basse température (soit l'eupéode d'Amérique ou la chamémyie glyphinivore). En laboratoire, les deux agents de lutte biologiques ont démontré une bonne ponte sur cette plante.

1.2.2.2 Puceron alternatif pour système de plante réservoir : puceron bicolore des céréales (*Rhopalosiphum padi* L.)

Une étude faite en 1991 a démontré que le puceron bicolore des céréales, *Rhopalosiphum padi* L. (Hemiptera : Aphididae) a grandement favorisé l'établissement d'agents de lutte biologique tels que les parasitoïdes *Aphidius matricariae* Haliday et la cécidomyie du puceron *Aphidoletes aphidimyza* Rondani en culture de concombre lorsqu'utilisé comme proie alternative pour un système de plante réservoir (Bennison, 1992). Ce puceron sera utilisé en tant que support animal pour le prédateur introduit en culture avec un système de plante réservoir. Ceci implique donc qu'il ne sera pas ravageur de la culture maraîchère à protéger, dans laquelle il sera introduit, mais restera confiné à l'orge (Andorno et López, 2014). C'est pour cette raison que nous l'avons

choisi; puisqu'il ne s'attaquera pas aux autres graminées maraîchères et en laboratoire, il est une excellente source nutritive favorisant la reproduction de l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore.

1.3 Système d'élevage

1.3.1 Plante d'élevage : Pomme de terre, *Solanum tuberosum* L. (Solanales : Solanaceae)

La pomme de terre est l'une des plantes les plus productives et son ravageur le plus important est le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* (Radcliffe, 1982). Pour ce projet de recherche, la pomme de terre sera utilisée comme support végétal pour le puceron vert du pêcher, pour l'eupéode d'Amérique et pour la chamémyie glyphinivore. Au laboratoire, nous l'utilisons puisqu'elle a un faible coût de production et une croissance rapide.

1.3.2 Puceron d'élevage : puceron vert du pêcher (*Myzus persicae* Sulzer)

Le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera : Aphididae) est un ravageur en culture partout à travers le monde et a plus de 875 plantes hôtes secondaires (Andorno et López, 2014). Pour ce projet de recherche, le puceron vert du pêcher sera

utilisé comme puceron d'élevage puisqu'il attaque bien la pomme de terre puis supporte bien les colonies de chamémyie glyphinivore et d'eupéode d'Amérique.

1.3.3 Chamémyie glyphinivore (*Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk)

La chamémyie glyphinivore est une espèce indigène en Amérique du Nord (Kaiser *et al.*, 2007). Elle est présente à travers l'Europe et en Asie, notamment en Suède, Italie, Italie, Russie, Ukraine ainsi qu'en Iran, Kazakstan, Turkmenistan, Izbekistan, et Tadzhikistan (Raspi, 1996). C'est une espèce de diptère très méconnue; il y a seulement quatre articles publiés concernant la chamémyie glyphinivore il y a très peu d'informations concernant son cycle de vie puis son comportement (Web of Science, 2015).

Les adultes font environ 2,5 mm de longueur (Raspi, 1996), possèdent un corps de couleur gris bleu-argenté et sont des prédateurs d'homoptères tels que les pucerons (McLean, 1992). Les œufs sont blancs et il y a trois stades larvaires (Sluss et Foote, 1973). La larve a une morphologie similaire aux larves des syrphes, sauf pour les stigmates postérieures qui sont séparées (celles des syrphes sont fusionnées). Elle est de couleur blanche ou jaune, et d'environ 4 mm de longueur au stade I, avec parfois avec les organes internes partiellement visibles. La larve de la chamémyie glyphinivore se déplace plus lentement et à de plus petites distances que les larves de syrphes (McLean, 1992). Le squelette céphalo-pharyngien du troisième stade larvaire possède de petits crochets buccaux. (Raspi, 1996).

La chamémyie glyphinivore est, selon nos observations, très probablement un prédateur furtif qui vit parmi ses colonies et ne déclenche pas de défense comportementale chez ses proies tout en bénéficiant d'une protection contre d'autres prédateurs (Lucas et Brodeur, 2001). Ceci procure également au prédateur un effet de dilution, ou un effet de horde égoïste où les individus au centre d'un groupe sont moins affectés par des événements de prédation que ceux en bordure du groupe. Ainsi, l'incidence de prédation intragUILDE par d'autres prédateurs est réduite (Lucas, 2005 et Dumont *et al.*, 2015). Alors, la survie de ce type de prédateur est intimement liée à la ressource et à sa capacité d'exploiter leurs mécanismes de défense. Des exemples de prédateurs furtifs sont la chamémyie glyphinivore (*Leucopis annulipes* Zetterstedt), une autre espèce du même genre, et la cécidomyie du puceron, *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera : Cecidomyiidae) (Fréchette *et al.*, 2008). D'autres espèces de *Leucopis* sont des prédateurs furtifs et *Leucopis glyphinivora* doit très probablement en être un. *Leucopis annulipes* a été observée lorsque les colonies de pucerons étaient à des densités modérées ou élevées (Fréchette *et al.*, 2008). Ces prédateurs réussissent bien en conditions de serre et avec une diète larvaire de pucerons (Gaimari et Turner, 1996). En fait, la chamémyie glyphinivore peut consommer environ 25 pucerons par jour (Barriault *et al.*, 2018a, Barriault *et al.*, 2018b). Tout comme l'eupéode d'Amérique, cet agent de lutte biologique a la capacité de se déplacer sur de grandes distances (Krsteska, 2015). De plus, l'avantage de l'utilisation de la chamémyie glyphinivore est qu'elle effectue sa pupaison directement sur la plante, contrairement à la cécidomyie du puceron qui effectue la sienne au sol (Jandricic, 2013). Il n'y a pas d'informations concernant le seuil thermique des différents stades de développement de la chamémyie glyphinivore, mais des observations laissent croire que son seuil d'activité serait entre 8 et 10°C (Fournier *et al.*, 2017). Une étude menée par Canale et al. A démontré qu'à 20°C, le cycle œuf-adulte est prolongé et qu'il y a une mortalité plus élevée qu'à 26°C (Canale *et al.*, 2002).

1.3.4 Eupéode d'Amérique (*Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann))

Anciennement connu sous *Metasyrphus americanus* (Wiedemann) (Diptera : Syrphidae) (Morris, 1998), *Eupeodes americanus* se retrouve un peu partout en Amérique du Nord et du Sud puis notamment au Québec (Vockeroth, 1992). L'eupéode d'Amérique est une espèce indigène qui joue un rôle de pollinisateur puisque les adultes, tel que le syrphe ceinturé (*Episyrphus balteatus* De Geer) se nourrissent de pollen et de nectar (Gontijo et al., 2013). Les œufs jaunes pâles et cylindriques sont déposés sur les feuilles où se trouvent des colonies de pucerons (Richard et Boivin, 1994). Chez d'autres syrphes et eupéodes, les femelles déposent leurs œufs selon l'abondance de ravageurs, dans ou près des colonies de pucerons en s'orientant avec l'odeur du miellat ou des sécrétions des cornicules de ceux-ci (Tehnhamberg et Poehling, 1995). Celles-ci possèdent donc un comportement de ponte remarquable en réponse à la taille de la colonie de pucerons, ce qui leur permet de trouver un site d'oviposition qui assurera le développement de leur progéniture (Almohamad et al., 2009). L'eupéode d'Amérique a trois stades larvaires, qui sont prédateurs de pucerons (Agriculture and Agri-Food Canada, 2011). Il y a très peu d'informations concernant l'eupéode d'Amérique (seulement 6 articles publiés selon Web of Science, 2015). En Europe les syrphes gagnent de plus en plus d'importance en tant qu'agents de contrôle en lutte biologique. Plusieurs études ont prouvé l'efficacité des syrphes contre les ravageurs en serre et en champ (Leroy et al., 2010). De plus, des recherches ont démontré que les syrphes aphidiphages sont des ennemis naturels efficaces des pucerons (Schneider, 1969; Almohamad et al., 2009). Les larves, actives à 4°C, sont de couleur vert pâle ou rouge et vert puis rampent sur la plante à la recherche de proies. Les syrphes passent l'hiver sous forme de larve ou de pupe dans les feuilles mortes (Rotheray et Gilbert, 2011). Bien que l'adulte soit le stade le plus observable du cycle

de vie d'un syrphe, cet insecte passe la plus grande partie de son cycle de vie sous forme d'œuf, larve ou pupe (Morris, 1998). Des observations faites par Hart et al. Ont démontré que les mâles et les femelles se développent à des viteses similaires avec un taux d'émergence de l'œuf à l'adulte d'environ 17 jours à 22°C (Hart *et al.*, 1997). Tout comme la chamémyie glyphinivore, le seuil thermique de développement est inconnu pour l'eupéode d'Amérique, mais certaines observations laissent penser qu'il pourrait se situer aux alentours de 4°C (Hart *et al.*, 1997).

L'eupéode d'Amérique est un brachycère et a de bonnes capacités de vol (peut notamment faire du vol stationnaire et du vol arrière) ce qui lui permet de localiser des colonies de pucerons et de pondre ses œufs sur des grandes surfaces de terrain, tout comme d'autres syrphes (Almohamad *et al.*, 2009). Les larves sont très voraces et certaines espèces de syrphes telles que *Eupeodes fumipennis* Thompson (Diptera : Syrphidae) peuvent consommer jusqu'à 168 pucerons groseillers de la laitue, *Nasonovia ribisnigri* Mosley (Hemiptera : Aphididae) de stade III par jour, rendant leur contrôle efficace (Hopper *et al.*, 2011). Plusieurs études ont démontré que c'est le prédateur de pucerons en plus grand nombre dans des cultures extérieures au Nord de l'Europe et en Europe centrale (Bugg *et al.*, 2008). Aussi, la famille des Syrphidae est bien adaptée à des hausses de populations de pucerons tôt dans la saison (Tehnhamberg et Poehling, 1995) et peuvent bien les localiser avant d'autres prédateurs (Almohamad *et al.*, 2009). Enfin, comparativement à la chamémyie glyphinivore qui est un prédateur furtif, on ignore si l'eupéode d'Amérique est un prédateur furtif ou chercheur-actif. Un prédateur chercheur-actif déclenche chez les proies des réactions de défense et un dérangement de la structure de la colonie. Les comportements de défense que les pucerons manifestent en présence d'un prédateur actif sont donner des coups de pattes, tomber des feuilles ou quitter la colonie (Fréchette *et al.*, 2008). Les coccinelles, telles que la coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera : Coccinellidae)

(Fréchette *et al.*, 2008) et les chrysopes, comme *Chrysoperla externa* Hagen (Neuroptera : Chrysopidae), sont des prédateurs actifs souvent utilisés pour le contrôle des ravageurs en agriculture (Leroy *et al.*, 2010). Lors d'une étude de stage par Astrid Bigot et al., il a été démontré que les larves de stade I sont furtives, celles de stade II sont actives-furtives et celles de stades III restent à être confirmé.

Certaines espèces intensément étudiées et/ou commercialisées incluent le syrphe ceinturé, *Episyrrhus balteatus* DeGeer (Diptera : Syrphidae), *Sphaerophoria reppellii* Wiedemann (Diptera : Syrphidae) et le syrphe de la corolle *Eupeodes corollae* Fabricius (Diptera : Syrphidae). Une étude présentement en cours a démontré que l'eupéode d'Amérique, malgré sa taille supérieure, a la même durée de développement que la cécidomyie, *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera : Cecidomyiidae), un autre agent de lutte biologique commercialisé (Ouattara, 2018). Les prochains objectifs de cette étude en vue de déterminer le potentiel de commercialisation de l'eupéode seront de déterminer la longévité des adultes, sa capacité de reproduction et son potentiel de prédation en comparaison avec la cécidomyie.

1.4 Objectifs et hypothèses

L'objectif général est d'évaluer le potentiel de deux nouveaux agents de lutte contre le puceron de la digitale et développer un système de plante réservoir à basse température en serre commerciale maraîchère.

A) Objectifs spécifiques en laboratoire :

1. Évaluer si l'eupéode d'Amérique et la chamémyie glyphinivore peuvent voler à basse température
2. Évaluer si ces deux prédateurs peuvent pondre à basse température
3. Évaluer la voracité des larves d'eupéode d'Amérique et de la chamémyie glyphinivore digitale à basse température
4. Comparer les deux agents de lutte et sélectionner le plus efficace à basse température

Hypothèse pour A) :

Hypothèse générale: L'eupéode d'Amérique sera plus efficace que la chamémyie glyphinivore à basse température (12, 15 et 18°C) contre le puceron de la digitale.

Prédictions pour A) :

Prédiction 1.1. *Eupeodes americanus* sera plus actif que *Leucopis glyphinivora* à de basses températures. Alors, l'eupéode d'Amérique conservera une bonne capacité de vol à des températures sous 18°C puisque les syrphes en général ont un seuil inférieur de développement à 4°C, donc sont actifs à de plus faibles températures (Dixon *et al.*, 2005).

Prédiction 1.2. Étant donné la différence de taille, il y aura une ponte supérieure (en termes du nombre d'œufs pondus) pour l'eupéode d'Amérique à de basses températures comparativement à la chamémyie glyphinivore si on laisse assez de temps pour la maturation des ovaires.

Prédiction 1.3. Les larves d'*Eupeodes americanus* consommeront plus de pucerons que les larves de *Leucopis glyphinivora* à 12°C, 15°C et 18°C. Certaines espèces de syrphes qui ont été étudiées peuvent consommer un très grand nombre de pucerons par jour, soit jusqu'à 168 pucerons par jour (Hopper *et al.*, 2011), tandis que la chamémyie glyphinivore, quant à lui peut en consommer environ 25 par jour (Barriault *et al.*, 2018b). De plus le syrphe a une plus grande taille que le chamemyide.

B) Objectifs spécifiques en serres :

1. Évaluer l'efficacité d'un système de plante réservoir en serre expérimentale avec le meilleur agent de contrôle
2. Évaluer l'efficacité d'un système de plante réservoir en serre commerciale avec le meilleur agent de contrôle

Hypothèse pour B) :

La présence d'un système réservoir en serre va promouvoir l'établissement des prédateurs (sélectionné en laboratoire) en serre en leur fournissant une source alternative de proies avant même que la population de ravageurs atteigne de hautes densités, et améliorera ainsi le niveau de contrôle du puceron de la digitale.

Prédictions pour B) :

Prédiction 1.1. Le système de plante réservoir va permettre aux prédateurs de se reproduire en absence de proies dans la culture. La plante réservoir supportera des populations du prédateur à basse température en serre expérimentale.

Prédiction 1.2. Les populations de ravageurs présents en serres commerciales vont diminuer en présence de système de plante réservoir.

CHAPITRE I

ÉVALUATION DE DEUX AGENTS DE LUTTE BIOLOGIQUE POTENTIELS CONTRE LE PUCERON DE LA DIGITALE À BASSE TEMPÉRATURE

Ymilie Bellefeuille¹, Marc Fournier¹, Eric Lucas^{1*}

¹Laboratoire de Lutte Biologique, Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal (UQAM), C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec H3C 3P8, Canada.

Résumé: Le puceron de la digitale, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae), est devenu l'un des ravageurs les plus importants en horticulture et se reproduit bien entre 10-18°C. Actuellement, seule la lutte chimique est employée puisqu'aucun agent de lutte biologique n'est commercialement disponible à ces températures. Deux agents de lutte biologique potentiels ont été évalués : la chamémyie glyphinivore, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae) et l'eupéode d'Amérique, *Eupeodes americanus* (Wiedemann) (Diptera: Syrphidae). Le vol actif, la ponte et la voracité ont été évalués à 12°C, 15°C et 18°C. La proportion d'individus ayant démontré un vol actif a diminué à 12°C pour l'eupéode et a diminué à 12°C et 15°C pour la chamémyie glyphinivore. Le délai avant le vol actif était plus long pour les deux espèces à 12°C. Plus d'eupéodes ont pondu après 7 jours (12°C, 15°C et 18°C) que la chamémyie glyphinivore. L'eupéode a pondu plus d'oeufs que la chamémyie glyphinivore à 12°C, 15°C et 18°C. Après 7 jours de plus à 12°C, la ponte a augmenté pour les deux espèces. La consommation journalière de pucerons diminuait avec la diminution de température pour les deux espèces mais la consommation totale ne diminuait pas, peu importe la température. Les larves d'eupéode consommaient 2 fois plus de pucerons que la chamémyie glyphinivore aux trois températures. Cette étude démontre clairement que l'eupéode est supérieur à la chamémyie glyphinivore à

basse température et identifie celui-ci comme étant un agent de lutte biologique potentiel contre le puceron de la digitale.

Mots clés : basse température, horticulture, prédation, ponte, vol.

Abstract: The foxglove aphid, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae), has become a significant pest in horticulture as it can build high populations from 10-18°C. Currently, chemical control is used as no commercially available biocontrol agent is effective at these temperatures. Two potential biocontrol agents were evaluated: the silverfly, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae) and the American hoverfly, *Eupeodes americanus* (Wiedemann) (Diptera: Syrphidae). Active flight, oviposition and larval voracity were tested at 12°C, 15°C and 18°C. The proportion of individuals demonstrating flight decreased at 12°C for the hoverfly and decreased at 12°C and 15°C for the silverfly. Delay before active flight was greater for both species at 12°C. More hoverflies laid eggs after 7 days (12°C, 15°C and 18°C) compared to silverflies. Hoverflies laid a higher number of eggs than silverflies at all temperatures. When given an additional 7 days at 12°C, oviposition increased for both species. Daily aphid consumption decreased as temperature decreased for both species, but average total consumption did not decrease regardless of the temperature. Hoverfly larvae consumed 2 times more aphids than silverfly larvae at all temperatures. This study demonstrates a clear superiority of the hoverfly over the silverfly at low temperatures, and identifies it as a potential biocontrol agent of the foxglove aphid.

Keywords: low temperature, horticulture, predation, oviposition, flight.

1.1 Introduction

The foxglove aphid, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae) originates from Europe and has become a cosmopolitan pest (Blackman and Eastop 2000). It attacks many commodities such as soybeans in Korea and Japan (Takada et al., 2006), lettuce in South America (De Conti et al., 2011) and greenhouse peppers in

Spain (Sanchez et al., 2007). In north-eastern America, the foxglove aphid is a growing problem in horticulture (Jandricic et al., 2014). The foxglove aphid is quite polyphagous and capable of attacking many mono and dicotyledonous plant species, greenhouse vegetables, and floriculture plants (Jandricic et al., 2014). Its toxic salivary excretions lead to the deformation of leaves and fruits (Sanchez et al., 2007) and it can be a viral vector (Jandricic et al., 2010; Yovkova et al., 2013). Furthermore, the honeydew produced by the foxglove aphid supports the growth of *Cladosporium*, or fumagine, on leaves which disrupts photosynthesis (Richard and Boivin 1994). As agricultural production for greenhouse ornamentals in North-eastern America starts in January and February, the temperature in greenhouses is kept lower in order to save on heating costs (University of Minnesota's Center for Urban and Regional Affairs and Center for Sustainable Building Research, 2013). Contrary to other species of aphids, the foxglove aphid has a high fecundity at 5°C, 10°C, and 20°C, where few natural enemies are effective (Jandricic et al., 2010).

Physiology, development and behavior of insects are strongly linked to temperature (Teets and Denlinger, 2013; Denlinger and Lee, 2010). Many species of natural enemies do not perform well at lower temperatures due to effects on development time, longevity, mortality, and reproduction (Langer et al., 2004). Rearing method at optimal temperatures could be one explanation as this selects for individuals adapted to higher temperatures. For example, a study by Sørensen et al. has shown that cold acclimation of *Adalia bipunctata* may increase biocontrol efficiency but reduces pupal survival and heat tolerance (Sørensen et al., 2013). In a study done by Helgadóttir et al. (2017), it was shown that aphid predation was greater for *Orius majusculus* (Heteroptera: Anthocoridae) when reared at 20°C, and lower when reared at 12°C (Helgadóttir et al., 2017).

Most commercially available biological control agents are ineffective against the foxglove aphid at low temperatures (Jandricic 2013). *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera: Cecidomyiidae) becomes less efficient against this pest when temperatures are below 20°C in horticultural greenhouses (Alotaibi, 2008; Lee et al., 2008). Commercially available ladybirds are not the best predators at low temperatures, with their optimal temperatures sitting higher at 23-27°C for *Adalia bipunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae) (Jalali et al., 2010) and 29°C for *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville (Coleoptera: Coccinellidae) (Obrycki and Tauber, 1982). Other common predators such as *Adalia bipunctata* (Schüder et al., 2004) and *Hippodamia convergens* (Katsarou et al., 2005) consume few aphids when temperatures fall below 15°C. Lacewings such as *Chrysoperla rufilabris* Burmeister or *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: Chrysopidae), which are normally used as predators in temperatures ranging from 12°C - 35°C, do not pupate as well in greenhouse environments and show cannibalistic behaviors (Jandricic 2013). Currently in Québec, *Aphidius ervi* Haliday (Hymenoptera: Braconidae) is only used when temperatures during the day are above 20°C and above 18°C at night. Wild populations of *A. ervi* fly around 15°C despite the fact that they can oviposit at temperatures above 10°C (Langer et al., 2004), however no such data exists on commercial populations. As discussed above, mass reared individuals at optimal temperatures might not perform as well at low temperatures. In greenhouses, *A. ervi*'s behaviour increases the dropping frequency of the foxglove aphid, therefore leading to a higher dispersion of the pest (Gillespie and Acheampong, 2012). Furthermore, *A. ervi* is commonly used for the control of *A. solani* in glasshouses but aphid control is often disrupted by hyperparasitoids (Rocca and Messelink, 2017). Although there has been a study on the parasitoid *Praon volucre* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae) in Brazil against the foxglove aphid, it was done at higher temperatures (18°C, 20°C, 22°C, 24°C, and 26°C) (Silva et al., 2015). Globally, there is no biological control agent commercially available for use at

low temperatures (10°C - 20°C) against the foxglove aphid. Insecticides currently used against aphids in Canada on ornamental crops include: Intercept™ 60 WP (imidacloprid), Endeavor® 50 WG (pymetrozine), Dibrom® (naled), and Cygon® 480 (dimethoate) (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2014). In the present study, we evaluated two potential biocontrol agents foxglove aphid.

The first potential biological control agent is the American hoverfly, *Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann) (Diptera: Syrphidae). It is a Nearctic species which is widespread across North America (Vockeroth, 1992) and a generalist aphid predator (Rojo et al., 2003). The biology of the American hoverfly has not been studied extensively, however other syrphids that are predators of aphids are active early in the spring and late in the fall; when temperatures are lower (Dixon et al., 2005; Tamaki et al., 1967). This is consistent with the thermal development threshold of other syrphid species, which is between 5°C and 7°C (Hart et al., 1997; Honěk and Kocourek, 1988). Syrphidae are well adapted to aphid populations increases early in the season and can detect them before other predators (Almohamad et al., 2009). Many studies have shown that the hoverfly is an effective biological control agent against pests in greenhouses and in the field (Leroy et al., 2010). At present, no data is available on the thermal development thresholds for this species in particular; however, young larvae consume aphids in Petri dishes kept at 4°C (observation. Bellefeuille, unpublished data).

The second potential biocontrol agent, the silverfly, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae) is a Holarctic species, prevalent in the Palearctic region from Spain and France to Israel (Beschovski and Merz, 1998; Kahanpää, 2014), Middle-East (Satar et al., 2015), Afghanistan and the Far East. This species has also been recorded in the Nearctic region in California (Kaiser et al., 2007). *Leucopis glyphinivora* shares the same biology as *Leucopis annulipes*. Larvae have good mobility and are generalist furtive aphid predators (Fréchette et al., 2008). It has

been shown that they consume many species of aphids (Satar et al., 2015). The silverfly's development threshold is unknown, but adult *Leucopis pinicola* Malloch (Diptera: Chamaemyiidae) can be found in North-eastern Ohio during the first week of May (Sluss and Foote, 1973). We can therefore assume that some species of this genus have a good tolerance to cold. Preliminary observations lead to the belief that the silverfly could be efficient at low temperatures (Y. Bellefeuille, unpublished data).

The aim of the present study was to assess the potential of two new candidate biological control agents, the American hoverfly, *E. americanus* and the silverfly, *L. glyphinivora* for the suppression of the foxglove aphid, *A. solani* at low temperatures. Both species were selected because, 1- they belong to a genera and family with low thermal thresholds, 2- they are polyphagous, 3- they are indigenous (or were naturalized a long time ago), and 4- it is possible to rear them in a laboratory. Active flight, female oviposition and larval voracity for both predators were evaluated and compared at low temperatures.

1.2 Materials and Methods

1.2.1 Insect rearing

All insect rearings were carried out at the Université du Québec à Montréal (UQÀM) in the Laboratoire de Lutte Biologique. Foxglove aphids (*Aulacorthum solani*) were provided by Dr. Rose Buitenhuis for the Vineland Research and Innovation Centre, Vineland Stations, ON, Canada. Insects were reared on Aristotle green pepper plants,

Capsicum annuum L. (Solanaceae) in a 35 X 35 X 35 cm cage kept in a growth chamber at 18°C, with a 16L: 8D photoperiod and 60% R.H.

Hoverfly (*Eupeodes americanus*) rearings were established from at least 100 individuals collected on *Phlox* sp. in Sainte-Agathe-de-Lotbinière (N 46°23'726" W 71°21'446"), Quebec, Canada in 2014. Rearing of individuals is based on the Frazer method (Frazer, 1972). Adults were kept in a 81 X 53 X 60 cm rearing cage covered in muslin which was kept in a greenhouse at 22°C during the day, 19°C at night and at 60 % R.H. Inside the rearing cage, a single flowering plant of sweet alyssum, *Lobularia maritima* L. (Brassicaceae), was kept in a 10 X 10 cm plastic pot and replaced when necessary. Adults were fed with a sugar: water mixture (1:10 v/v) in a solo cup with a dental cotton roll protruding from the lid and with an artificial flower consisting of a round cotton makeup remover saturated with a honey: water mixture (1:2 v/v) and covered with wildflower bee pollen. These were replaced twice a week. Green pepper plants, *Capsicum annuum*, infested with foxglove aphids were introduced into the rearing cage three times a week to allow oviposition. The eggs were collected by cutting the area of the leaf where they were laid then placed inside Petri dishes on top of round cotton makeup removers dampened with water. Petri dishes were kept in a refrigerator at 4°C, 60% R.H. and larvae were collected once a week. Larvae were transferred in the same type of cages as the foxglove aphids and put in a growth chamber set at 24°C, 16L: 8D, and 70% RH. These cages contained potato plants, *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae), infested with green peach aphids, *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae). Adults that emerged from the cages were then collected and introduced in the rearing cage kept in the greenhouse described above. Rearings were refreshed yearly with new wild individuals to keep genetic variability sufficient.

Silverfly (*Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk) rearings were established from at least 100 individuals collected on apple trees located in Montreal (N 45°51' W 73°56'), Quebec, Canada in 2009. Identification was done by Dr. Stephen D. Gaimari from the California Department of Food and Agriculture, CA, USA. Captured individuals were reared on potato plants inoculated with *M. persicae* following Gaimari and Turner (1996) methodology. Rearings were also refreshed yearly with new wild individuals. The colony was maintained in the same type of cages as the green peach aphids and kept in the same growth chamber as the hoverflies. Individuals were fed with a sugar: water mixture (1:10 v/v) in a solo cup and with an artificial flower as described above and brewer's yeast. These were replaced twice a week. Solo cup plastic lids were also covered with dry brewer's yeast and replaced once a week.

1.2.2 Experiment on active flight capacity at low temperatures

Active flight capacity can be defined as when an insect moves its wings in order to achieve displacement (Brodsky, 1994). This capacity was compared between the American hoverfly and the silverfly at 12°C, 15°C, and 18°C. At each temperature, a minimum of 16 males and 16 females aged of 18-36 hours from each species were individually placed in the center of a 30 X 30 X 27 cm Plexiglas® box with two 16 X 16 cm openings. The box was placed in a Conviron™ growth chamber, Model E15 at 700 LUX and 60% R.H. A HOBO® Data Logger Pro v2 Internal Temperature/Relative Humidity Data Logger (Model U23-001) was then used to measure the temperature inside the box. Insects were acclimated before starting the test by individually placing them in film canisters for at least 30 minutes outside of the test box. After this period, the canisters were placed inside the test box, and then opened. Each individual was

observed for a period of 10 minutes. The presence or absence of active flight, as well as the delay from introduction of the insect in the box to the observation of active flight was noted. The duration of flight wasn't recorded since it was not of interest to us but rather the capacity to fly. The average temperature was $17.9 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ for tests at 18°C , $14.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ for tests at 15°C and of $11.8 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ for tests at 12°C .

1.2.3 Experiment on oviposition at low temperatures

The number of eggs laid by American hoverfly and silverfly females was measured at 12°C , 15°C , and 18°C . At each temperature, twenty females and twenty males from each species aged less than 24hrs, were collected from the colony established in the laboratory. In order to evaluate the age of individuals, larvae were introduced in cages with potato plants and *M. persicae* only. The cages were followed daily and any individuals that emerged within a 24hr period were used for testing. One male and one female were introduced in a 45 X 18 cm transparent plastic cylinder with a muslin lid and two 12 X 12cm ventilated windows. Each cylinder contained a green pepper plant with 6-8 leaves inoculated with 200 foxglove aphids of different stages, collected with an aspirator. Adults were fed with a sugar: water mixture (1:10 v/v) in a solo cup and with an artificial flower as described above. For silverflies, a mixture of brewer's yeast and water (1:3) was added to the round cotton makeup remover and a solo cup lid filled with dry brewer's yeast was placed at the bottom of the green pepper plant. White sugar was also put on the cylinder lids and vaporized with water twice a day. The cylinders were placed in a Conviron™ growth chamber for 7 days at 12°C , 15°C , and 18°C and 14 days at 12°C , 16L: 8D, 50% R.H. Oviposition was evaluated only for 7 days and not for the life's duration because our objective was to evaluate if hoverflies were able

to oviposit at 12°C, 15°C, and 18°C. Extending the duration of the test, especially at 18°C, would have led to plant collapse by creating unsustainably large aphid populations. Test length was extended to 14 days at 12°C in order to account for any prolongation of egg maturation at this temperature. The number of eggs laid as well as the number of larvae on the plant was counted at the end of each trial, with larvae being counted as eggs for analyses. A HOBO® Data Logger was used to measure the temperature inside the growth chamber and temperature was attributed randomly to each growth chamber at each repetition.

1.2.4 Experiment on larval voracity at low temperatures

The number of aphids consumed by American hoverfly and silverfly larvae was calculated at 12°C, 15°C, and 18°C, 16L: 8D, 50% R.H. Green pepper plants with 6-8 leaves were individually placed in the same type of cylinders described earlier for the egg-laying tests. Thirty 2nd instar foxglove aphids from the laboratory colony were collected with an aspirator and placed on each green pepper plant. The test was divided into three treatments. In the first two treatments, a stage I larva of each species was introduced into the cylinders. The first treatment introduced the American hoverfly, and the second introduced the silverfly. The third treatment was to be used as a control where no larvae were introduced into the cylinders. For each treatment, there were 30 replicates. In order to compare the development of the larvae with that of the foxglove aphids, the duration of the test for each temperature was set to correspond to the time required for the accumulation of 75 degree-days by the aphid (under a threshold of 3°C). Cylinders were put inside a Conviron™ growth chamber for 5 days at 18°C, 6 days and 6 hours at 15°C, and 8 days, 8 hours at 12°C. A HOBO® Data Logger was

used to measure the temperature inside the growth chamber and temperatures were randomly assigned to each growth chamber. For all tests, if the temperatures measured varied $\geq 1^{\circ}\text{C}$ from the required temperature, the trial was discarded. If mortality was greater than 10% in controls for any given replicate, it was discarded. At the end of each test, the number of living aphids was calculated as such: initial density (30 aphids) - number of living aphids. If a larva was feeding on an aphid at the moment of data collection, it was considered as dead. Daily consumption was also calculated as follows: total consumption / duration of the test according to the temperature tested for.

1.2.5 Statistical analyses

For all experiments, statistical analyses were performed with the statistical package JMP® 12 (SAS Institute, 2015). For trials on active flight capacity at low temperatures, a log likelihood ratio test was done following a chi-square test to compare proportions of individuals that exhibited flight at all temperatures. A two-way ANOVA was used for the temperature factor and the repetition factor. Males and females for both the American hoverfly and the silverfly were compared; no significant differences were observed therefore the data was grouped. For average delay in seconds before active flight, only insects that demonstrated active flight were considered. A Tukey's HSD test was used to identify treatments that were significantly different from each other. For trials on total aphid consumption and for daily aphid consumption, an ANOVA was performed and blocks were compared amongst themselves for the same temperature. There was no significant difference between blocks for the two species studied therefore the data was grouped. For the experiment on egg-laying at low temperatures, a multiple linear regression was used to compare proportions of females

that laid eggs at all temperatures. An ANOVA was performed to analyze the average number of eggs laid by females at each temperature for both test trial lengths (7 and 14 days). A Tukey's HSD test was used to identify which treatments were significantly different from each other. Assumptions for parametric analyses were fulfilled following a Shapiro-Wilk test of normality ($p > 0.05$); no transformations were required.

1.3 Results

1.3.1 Active flight capacity at low temperatures

All American hoverflies demonstrated active flight at 18°C, 88.7% of individuals could fly at 15°C, while only 14.5% could fly at 12°C. For the silverfly, 88.7% demonstrated active flight at 18°C, 24.1% at 15°C, and 7.8% at 12°C (Figure 1.1A). The proportion of hoverflies that demonstrated active flight was greater than the proportion of silverflies that flew at temperatures of 18°C ($\chi^2 = 10.411$, $df = 1$, $P = 0.00131$) and 15°C ($\chi^2 = 57.805$, $df = 1$, $P < 0.0001$). There was no difference between the two species at 12°C ($\chi^2 = 1.261$, $df = 1$, $P = 0.2614$). Delays before active flight varied according to all 3 temperatures for the American hoverfly ($F_{2, 141} = 15.6$, $P < 0.01$) and the silverfly ($F_{2, 64} = 18.8$, $P < 0.01$) (Figure 1.1B). No significant difference was observed between the two species at 12°C ($F_{2, 13} = 11.5$, $P = 0.57$), 15°C ($F_{2, 76} = 11.5$, $P = 0.63$), and 18°C ($F_{2, 116} = 11.5$, $P = 0.99$).

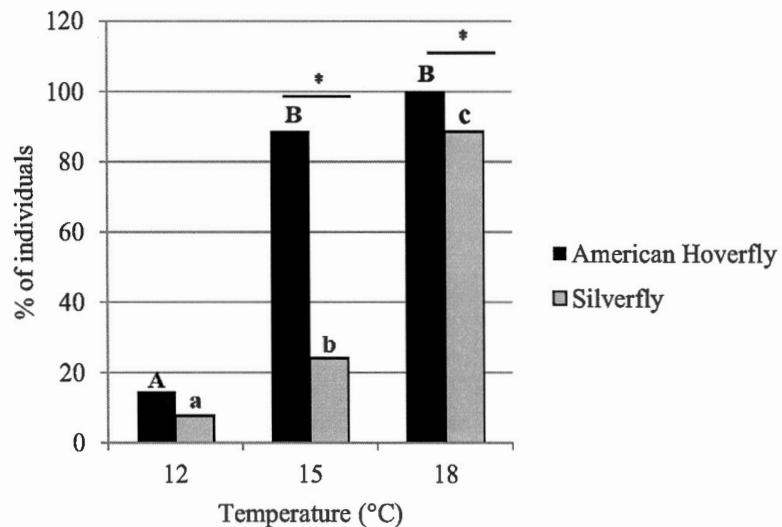
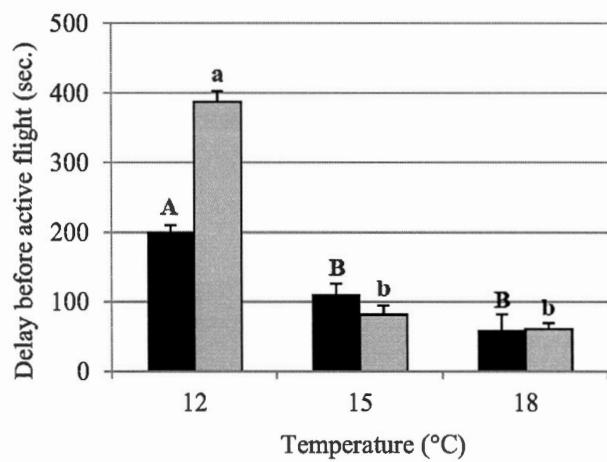
A)**B)**

Figure 1.1 Percentage (+SE) of individuals having demonstrated active flight (A) and average delay (+SE) in seconds before active flight (B) at 12°C, 15°C, and 18°C for the American hoverfly (n= 69 at 18°C, n= 71 at 15°C, n= 62 at 12°C) and the silverfly (n= 53 at 18°C, n= 54 at 15°C, n= 51 at 12°C). Treatments with an asterisk are significantly different (ANOVA, p < 0.05).

1.3.2 Oviposition at low temperatures

Only the tests where the female was still alive at the end of each trial were considered. Mortality for female hoverflies was 13% (after 7 days) and 24% (after 14 days) at 12°C, 13% at 15°C, and 19% at 18°C. Mortality for female silverflies was 6% (after 7 days) and 4% (after 14 days) at 12°C, 7% at 15°C, and 5% at 18°C. Temperature significantly influenced the proportion of female hoverflies and silverflies that laid eggs on the plant after 7 days ($R^2 = 0.9935$, $df = 1$, $P < 0.01$). No female silverfly laid eggs at 12°C after 7 days. The proportion of hoverflies having laid eggs is at least 4 times as high as the proportion of silverflies that oviposited at 15°C (Figure 1.2).

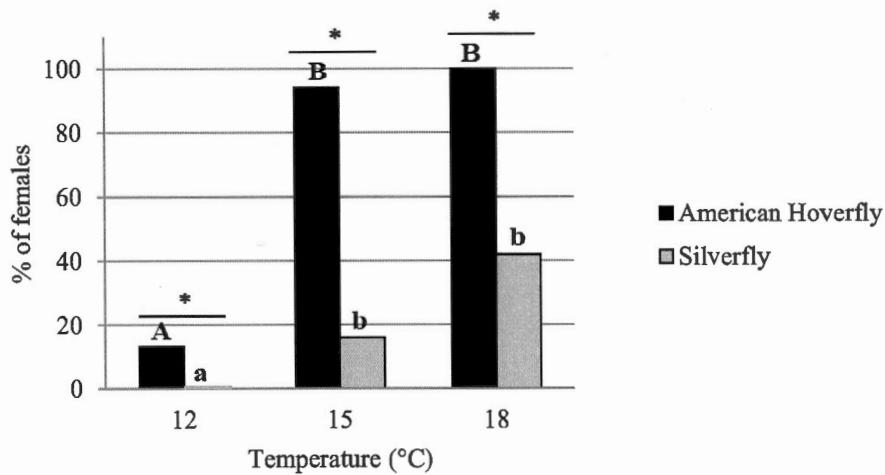
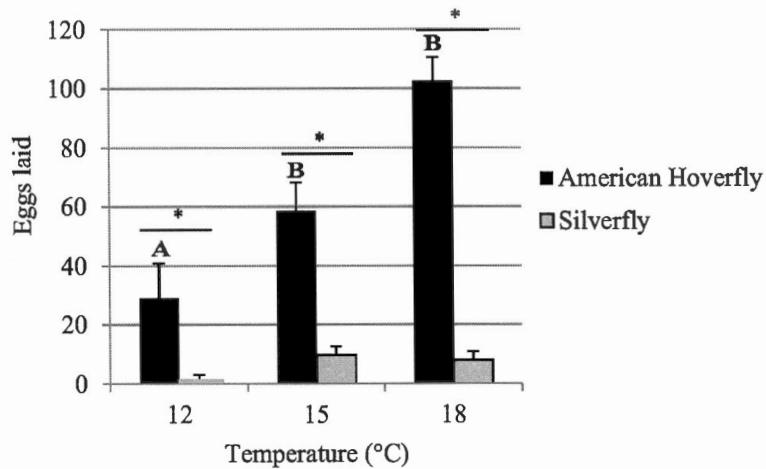


Figure 1.2 Percentage of females having laid eggs over a period of 7 days for the American hoverfly *Eupeodes americanus* (n= 24 at 18°C, n= 30 at 15°C, n= 59 at 12°C) and the silverfly, *Leucopis glyphinivora* (n= 35 at 18°C, n= 34 at 15°C, n= 46 at 12°C). Treatments with an asterisk are significantly different (ANOVA, $p < 0.05$).

The average number of eggs laid by female hoverflies after 7 days varied significantly according to temperature ($F_{2, 112} = 80.03, P < 0.01$, Figure 1.3.A). The hoverfly significantly laid more eggs than the silverfly at 18°C ($F_{2, 59} = 90.70, P = < 0.01$), 15°C ($F_{2, 64} = 90.70, P = < 0.01$), and 12°C ($F_{2, 105} = 90.70, P = < 0.01$).

After giving females of both species an additional period of 7 days (14 days total) that did not lay any eggs after 7 days at 12°C , the average number of eggs laid significantly increased from 11.6 to 101 for the hoverfly ($F_{2, 79} = 49.3310, P < 0.01$) but the difference from 0 to 1.33 for the silverfly was not as significant ($F_{2, 79} = 49.3310, P = 0.99$, Figure 1.3B). The average number of eggs laid by the American hoverfly was significantly greater than the silverfly after 7 days ($F_{2, 105} = 84.73, P < 0.01$) and 14 days at 12°C ($F_{2, 53} = 53.12, P < 0.01$). Finally, at 12°C , the average number of eggs laid by female hoverflies after 14 days was significantly greater than the average number of eggs laid by female silverflies after 7 and 14 days ($F_{2, 79} = 49.3310, P < 0.01$).

A)



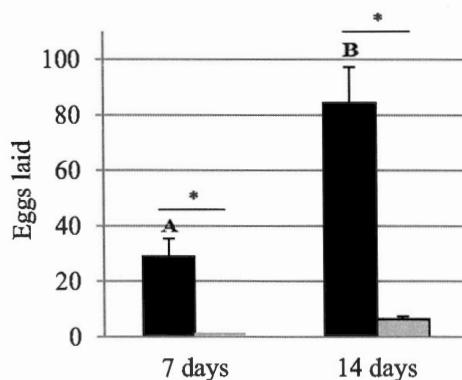
B)

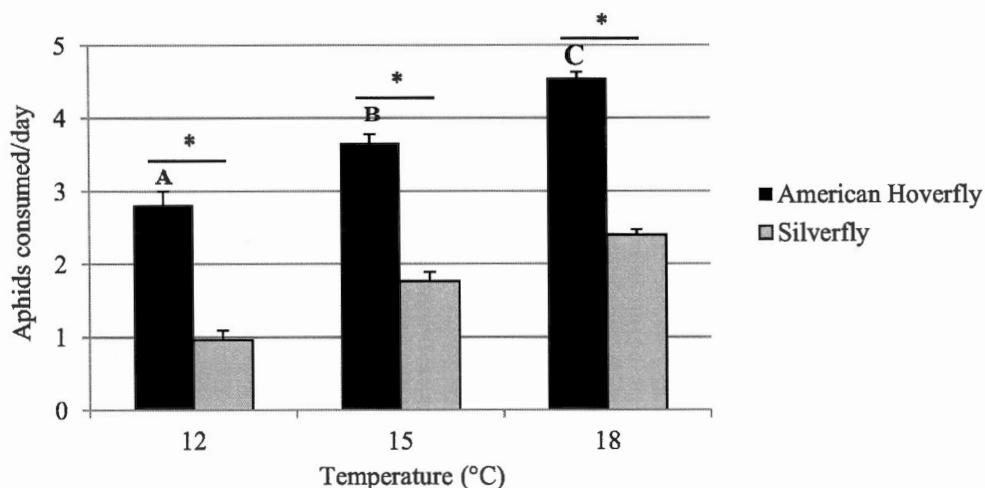
Figure 1.3 Average number of eggs (+SE) laid by female American hoverflies, *Eupeodes americanus* (n= 24 at 18°C, n= 30 at 15°C, n= 59 at 12°C) and silverflies, *Leucopis glyphinivora* (n= 35 at 18°C, n= 34 at 15°C, n= 46 at 12°C) over a period of 7 days at 12°C, 15°C, and 18°C (A) and over a period of 7 and 14 days (n= 20 for *E. americanus* and n=33 for *L. glyphinivora*) at 12°C (B). Treatments with an asterisk are significantly different (ANOVA, p < 0.05).

1.3.3 Larval voracity at low temperatures

Daily consumption of aphids by silverfly increased with temperature, from 1.92 at 12°C to 4 aphids/day at 18°C (Figure 1.4A). The highest daily consumption for the hoverfly was 5.8 aphids /day at 18°C followed by 4.8 aphids /day at 15°C and 3.6 aphids /day at 12°C. Average daily aphid consumption was at least 2 times greater for the hoverfly when compared to the silverfly ($F_{2, 239} = 175.55, P < 0.01$). Daily aphid consumption was significantly greater for the hoverfly when compared to the silverfly at 18°C ($F_{2, 83} = 235.05, P < 0.01$), 15°C ($F_{2, 73} = 235.05, P < 0.01$), and 12°C ($F_{2, 83} = 235.05, P < 0.01$).

Total aphid consumption, when the duration of the tests was equal to a 75 DD development for the aphid, was significantly higher for the American hoverfly at all temperatures and was at least 3 times greater than the silverfly ($F_{2, 239} = 166.13, P < 0.01$, Figure 1.4.B). Total aphid consumption was significantly greater for the hoverfly when compared to the silverfly at 18°C ($F_{2, 83} = 222.38, P < 0.01$), 15°C ($F_{2, 73} = 222.38, P < 0.01$), and 12°C ($F_{2, 83} = 222.38, P < 0.01$).

A)



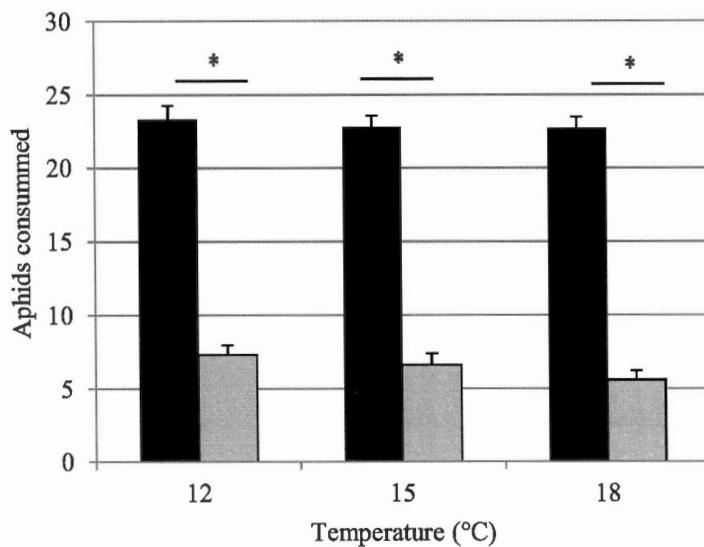
B)

Figure 1.4 Average daily consumption (A) and average total consumption (B) of foxglove aphids (+SE) by American hoverfly ($n= 32$ at 18°C , $n= 32$ at 15°C , $n= 32$ at 12°C) and silverfly ($n= 51$ at 18°C , $n= 41$ at 15°C , $n= 51$ at 12°C) larvae. Treatments with an asterisk are significantly different (ANOVA, $p < 0.05$).

1.4 Discussion

In accord with what occurs with most invertebrates, performances of both the American hoverfly and the silverfly were negatively affected at low temperatures. However, while the silverfly is clearly not an adequate potential biological control agent against the foxglove aphid at low temperatures, the American hoverfly demonstrated a high potential and should be considered for testing its efficacy in commercial cropping systems in North-America.

This is the first study to look at the efficiency of the American hoverfly against the foxglove aphid in terms of active flight, oviposition, and voracity at low temperatures. Hoverflies were more efficient in terms of active flight at low temperatures when compared to silverflies. They are also the only predator currently employed for the control of *Myzus persicae* on peach trees in the Yakima Valley, Washington, in September and October when temperatures were lower (Tamaki et al., 1967).

Considering oviposition performance, the delay before ovarian or egg maturation may be longer at 12°C which may explain why females of both species laid a higher number of eggs after 14 days compared to 7 days. During this study, mating capacity was also evaluated alongside egg-laying capacity, as virgin predators were used for measuring fecundity.

Considering larval voracity, American hoverfly larvae consumed almost 3 times more aphids at all temperatures when compared to the silverfly. At the end of each test, hoverfly individuals were still at the third larval stage. Of the three larval stages, more than 80% of consumption is done at the third larval stage for Syrphidae in general (Schneider, 1969). In 2011, Hopper et al. had shown that larvae of different syrphid species have a daily aphid consumption rate higher than other groups of aphidophagous predators. Moreover, lifetime larval consumption was greater at lower temperatures for the hoverfly *Melangyna viridiceps* Macquart and *Symosyrphus grandicornis* Macquart (Soleyman-Nezhadiyan and Laughlin, 1998) and *Syrphus ribesii* L. (Diptera: Syrphidae) (Sundby, 1966) due to longer development time at cooler temperatures. We should therefore expect similar results with *E. americanus*. In this study, daily aphid consumption corresponding to an accumulation of 75 DD for aphids neither decreased or increased at all temperatures tested for both the American hoverfly and the silverfly. Thus, the impact of the predator was the same, regardless of drops in temperature, according to a standardized development time of the focal pest.

The silverfly, while not as efficient at low temperatures against the foxglove aphid, might still be an interesting candidate biological control agent for greenhouse vegetables at higher temperatures. The silverfly is a furtive predator, meaning that it can develop within an aphid colony and generate a lesser number of defensive behaviors within these colonies (Fréchette et al., 2008). This type of furtive behavior also generates a dilution effect (Lucas and Brodeur, 2001) and a selfish herd effect (Dumont et al., 2015), which decrease intraguild predation on the furtive predator. Since the silverfly is less vulnerable to intraguild predation due to dilution and the selfish herd effect, it may be successfully used jointly with other biocontrol agents. Also, some species of the *Leucopis* Meigen genus are efficient in glasshouse environments (Gaimari and Turner, 1996) and prey upon numerous aphid species in around twenty genera (Satar et al., 2015).

Other biocontrol agents have been tested against aphids at low temperatures. A similar study by Langer et al. (2004) done in Belgium evaluated the oviposition (2, 4, 6, 8, 10, 15, and 20°C) and flight (10, 12, 14, and 16°C) in opaque cylinders of four parasitoid species (*Aphidius rhopalosiphii*, *A. ervi*, *Praon volucre*, and *P. gallicum*). Another approach for controlling aphids at low temperatures could be the use of generalist predators, such as mirid predatory bugs (Messelink et al., 2015), that can survive well in absence of aphids and at low temperatures. This enables them to respond faster to new aphid colonies than syrphids, which need to first oviposit, and in cases of low temperatures, require additional days before the eggs hatch and predation can begin. The constraint is that in Canada, only a single mirid species, *Dicyphus hesperus* is available commercially to control whiteflies (McGregor et al., 1999), thrips (Shipp and Wang, 2006), and the green peach aphid (McGregor and Gillespie, 2004).

According to the present results, it remains difficult to assess the potential of the hoverfly in glasshouses based on tests in small cages and cylinders. Nevertheless, in

the study presented above (Langer et al., 2004), trends in the results obtained in cylinders (flight and oviposition activities) were confirmed in real conditions. There is still much more work to be done before commercialization. First, in order to validate the potential of the syrphid at low temperatures in commercial greenhouses, the relative humidity must also be considered. For example, Braconidae were studied under constant temperatures and varying levels of relative humidity and it was observed that under high relative humidity, flight capacity increased (Abraham, 1975). Furthermore, it would be relevant in future studies to compare the effect of relative humidity on oviposition of different sized auxiliaries such as the American hoverfly and the silverfly. Starý (1970) established that reproductive success of smaller insects was affected negatively by low humidity (Starý, 1970). Relative humidity has also been shown to affect performance and developmental time of immature stages of *Sphaerophoria rueppelli* Wiedemann (Diptera: Syrphidae) (Amorós-Jiménez et al., 2012). Finally, since Juillet (1964) demonstrated that only extremes of relative humidity cause drastic reductions in the flight activity of biological control agents such as parasitic wasps, we can expect that the efficiency of the hoverfly should not be potentially affected in commercial greenhouses (Juillet, 1964).

Second, the present study did not look at oviposition responses to aphid colony sizes as Sutherland et al. (2001) have done for *Episyrphus balteatus*. Studying aphid density thresholds for the American hoverfly would allow us to better understand syrphid oviposition mechanisms and the way they can contribute to lowering foxglove aphid populations (Sutherland et al., 2001). As was done in a study by Langer (2004) on oviposition at low temperatures of four aphid parasitoid species, it would also be interesting to look at offspring survival and sex-ratios, the influence of male densities on female oviposition, as well as sperm fitness (see Langer et al., 2004 for four aphid parasitoid species).

Third, the efficacy of the hoverfly in a real commercial greenhouse environment must be evaluated. Preliminary results confirm the potential of the American hoverfly against the foxglove aphid on a larger scale. With these results, we will be able to estimate the time needed for aphid control at low temperatures when larvae or pupae are introduced in the system. Similar hoverflies such as *Episyrphus balteatus* De Geer (Diptera: Syrphidae) and *Sphaerophoria ruepellii* Wiedemann (Diptera: Syrphidae) have already been commercialized in Europe by Biobest® Belgium NV. *Episyrphus balteatus* is also produced by Koppert Biological systems (The Netherlands). However, both *E. balteatus* (Pu et al., 2017) and *S. ruepellii* (Barkalov, 2010) are Palearctic species native to Europe and Northern Asia. *Episyrphus balteatus* has been shown to prey upon *Sitobion avenae* (F.) (Hemiptera: Aphididae) (17°C), *Metopolophium dirhodum* (Walker) (Hemiptera: Aphididae) (14°C and 17°C) as well as on *Aphis fabae* (Scopoli) (Hemiptera: Aphididae) (15°C) (Tenhumberg, 1995). As for *S. ruepellii*, there is little information on the larval performance at low temperatures. However, adults are known to be active between 12°C-40°C, with an optimal range of 25°C - 35°C (Biobest Canada Ltd.).

Finally, this study brings new knowledge on two species of candidate biological control agents that could be interesting for biological control programs. The ultimate step leading to commercialization depends on many other aspects such as host location, dispersal, rearing difficulties as well as costs for mass production, market value, and efficacy in commercial cropping systems (Tauber et al., 2000). The application of biological control has yet to be increased (Lenteren, 2011), the diversity of wild biocontrol agents is underutilized, and an important gap remains to be filled (Putra and Yasuda, 2006).

1.5 Acknowledgements

We would like to thank Caroline Martineau, Émilie Lemaire, and Benoit Champagne from the “*Institut québécois du développement de l’horticulture ornementale*” (IQDHO) for their time and expertise. We would also like to thank the entire team from the “*Laboratoire de lutte biologique*”, Sylvain Dallaire and Jill Vandermeerschen. Finally, we would like to thank Dr. S.D. Gaimari, California Department of Food and Agriculture, for *Leucopis glyphinivora* identification and rearing advice. This study was funded by the “*Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec*”, Québec, QC, Canada (UQAM 1-13-1652).

CHAPITRE II

BIOLOGICAL CONTROL OF THE FOXGLOVE APHID USING A BANKER PLANT SYSTEM WITH *EUPEODES AMERICANUS* (DIPTERA: SYRPHIDAE) IN EXPERIMENTAL AND COMMERCIAL GREENHOUSES

Ymilie Bellefeuille¹, Marc Fournier¹, Eric Lucas^{1*}

¹Laboratoire de Lutte Biologique, Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal (UQAM), C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec H3C 3P8, Canada

Résumé : Le puceron de la digitale, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae), est devenu un ravageur important en serre horticole au Québec en raison du fait qu'il peut se reproduire à basses températures, entre 10 et 18°C, quand aucun agent de lutte biologique commercialement disponible n'est efficace. Dans l'étude précédente (Chap. I), l'eupéode d'Amérique, *Eupeodes americanus* Wiedemann (Diptera: Syrphidae), a démontré une bonne capacité de vol actif, de ponte et une bonne voracité larvaire à 12 °C, 15 °C et 18 °C. Dans la présente étude, l'efficacité d'un système de plante réservoir avec l'eupéode d'Amérique est évaluée dans des serres expérimentales (petite échelle) et commerciales (grande échelle) à basse température. Les résultats démontrent un très bon potentiel de l'eupéode d'Amérique pour le contrôle des populations du puceron de la digitale. Le syrphe a utilisé les systèmes de plante réservoir comme ressources nutritives et se reproduisait adéquatement sur celles-ci. Les plants de poivrons vert infestés par des pucerons de la digitale et exposés aux syrphes abritent un nombre significativement plus bas de pucerons à la fin des tests comparativement aux témoins (innaccessibles au prédateur). Dans les serres commerciales, les adultes qui émergeaient des systèmes de plante réservoir étaient capables de localiser les plantes infestées, de pondre et de contrôler efficacement les populations de pucerons après 6 semaines. Cette étude démontre le potentiel de

développer davantage les systèmes de plante réservoir avec les syrphes en serre ainsi que l'importance d'étudier de nouveaux agents de lutte biologique.

Mots clés : *Eupeodes americanus*, horticulture, *Aulacorthum solani*, système de plante réservoir, *Rhopalosiphum padi*

Abstract: The foxglove aphid, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae), has become a significant pest in horticulture as it can build high populations from 10 to 18 °C, when no commercially available biocontrol agent is efficient. In a previous study, the American hoverfly, *Eupeodes americanus* Wiedemann (Diptera: Syrphidae), has demonstrated good active flight, oviposition, and larval voracity at 12 °C, 15 °C, and 18 °C. In the present study, the efficiency of a banker plant system using the American hoverfly was tested in experimental (small environment) and commercial greenhouses (large environment) at low temperatures. The results demonstrate the high potential of the American hoverfly for the control of foxglove aphid populations; it used the banker plant systems for nutritional resources and successfully reproduced on them. Green pepper plants infested by foxglove aphids and exposed to hoverflies had a significantly lower number of aphids by the end of the trial compared to the control (protected by muslin). In commercial greenhouses, adults that emerged from banker plant systems were able to locate infested plants, oviposit, and effectively control aphid populations after 6 weeks. This study shows the potential to further develop banker plant systems with hoverflies in greenhouse environments as well as the importance of studying new biocontrol agents.

Keywords: *Eupeodes americanus*, horticulture, *Aulacorthum solani*, open-rearing system, *Rhopalosiphum padi*

2.1 Introduction

Over the years, there has been an increasing demand in Canada for products without pesticide residues (Louden and MacRae, 2010) and consequently for greater effectiveness of biological control when releasing natural enemies in market garden greenhouses (Messelink et al., 2014). The polyphagous foxglove aphid *Aulacorthum*

solani Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae) can attack many plant species such as Pansy, *Calibrachoa*, and *Salvia* (Jandricic et al., 2014). Chemicals, such as neonicotinoids (InterceptTM) are used against the foxglove aphid and have environmental consequences (Benelli and Bonsignori, 2014). The foxglove aphid reproduces very efficiently at low temperatures (10 to 20°C) and is one of the most difficult to control by biocontrol methods (Varga, 2017). Consequently, most biological control agents are ineffective against the foxglove aphid during production (Jandricic 2013). Currently, there is no commercial biological control agent available for use at low temperatures against the foxglove aphid in Canada (Schüder et al., 2004; Katsarou et al., 2005; Alotaibi, 2008; Jalali et al., 2010; Jandricic, 2013). In a previous study, Bellefeuille et al. (2018), compared the efficiency of two potential biocontrol agents, the silverfly, *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae) and the American hoverfly, *Eupeodes americanus* Wiedemann, at low temperatures against the foxglove aphid. Globally, the results demonstrated a clear superiority of the hoverfly over the silverfly at low temperatures and consequently a higher potential for biocontrol.

Eupeodes americanus is native from North America (Vockeroth, 1992) and larvae are generalist aphid predators (Rojo et al. 2003). It would be advantageous if the American hoverfly could be able to consume alternative preys (or other aphid species) when target pest populations become too low. *Eupeodes* larvae are mobile on large distances, and can consume a high number of aphids (Hopper et al., 2011, Bellefeuille et al., 2018). Furthermore, several Syrphid species are well adapted to detect aphid colonies early in the season before other predators and to impact them before significant increases in populations (Almohamad et al., 2009).

Banker plant systems or open-rearing systems consist of non-cultivated plants, usually a cereal plant (Frank, 2009) inoculated by an alternative aphid that will not affect the culture (Parolin et al., 2014). These systems are available for natural enemy populations

at all times, even before prey populations have established. They also increase plant diversity in greenhouses (monocultures) therefore providing more oviposition sites and alternative food sources to predators (Messelink et al., 2014). It has been shown that they increase the efficiency of biological control agents in their control of pest populations (Parolin et al., 2012). Moreover, in comparison to other augmentative biological control strategies that require repeated releases of predators, banker plant systems are more efficient over time (Avery et al., 2014). Studies have shown that aphid populations, such as *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae), *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae), and *Brevicoryne brassicae* (L.) (Hemiptera: Aphididae), amongst others, are lower in greenhouses containing banker plants systems compared to those without (Frank, 2009).

Acyrthosiphon pisum (Hemiptera: Aphididae), *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera: Aphididae), and *Sitobion avenae* (Fabricius) (Hemiptera: Aphididae) have been used as alternative prey for open-rearing systems and proven effective in their contribution to the control of the foxglove aphid in greenhouse environments (Ohta and Honda, 2010). *Rhopalosiphum padi* L. (Hemiptera: Aphididae) greatly favoured the establishment of biological control agents such as the parasitoid *Aphidius matricariae* Haliday (Hymenoptera: Aphidiidae) and the furtive predator *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) (Diptera: Cecidomyiidae) in cucumber cultures when used as an alternative prey for open-rearing systems (Bennison, 1992). The bird cherry-oat aphid (*R. padi*) also has been used as an alternative resource for banker plant systems and did not affect the ornamental culture into which it was introduced but stayed confined to the barley plant (Andorno and López, 2014). Jandricic et al., 2014 showed that this alternative prey also favors the establishment of predator populations in crop even before the arrival of pest populations, since they serve as alternative resources when aphid populations are still too low (Jandricic et al., 2014).

The objective of this study was to evaluate the effectiveness of a banker plant system involving the American hoverfly for the control of foxglove aphid populations at low temperatures in experimental (small environment) and commercial greenhouses (large environments). We formulate the hypothesis that 1) the banker plant system will allow oviposition and growth of American hoverfly population; 2) the presence of a banker plant system would maintain aphid populations under control in both experimental and commercial greenhouses regardless of the scale difference.

2.2 Materials and methods

2.2.1 Insect rearing

All insect rearings were done at the Université du Québec à Montréal (Laboratoire de Lutte Biologique). American hoverfly (*E. americanus*) and foxglove aphid (*A. solani*) rearings were done as described in Bellefeuille et al., 2018. Bird cherry-oat aphids (*R. padi*) were provided by Anatis Bioprotection Inc. and reared on barley plants planted in round 10.16 cm pots with black soil. Aphids were kept in 35 X 35 X 35 cm cages covered with muslin and these cages were kept in a growth chamber set at 24°C, with a 16L: 8D photoperiod, and 60% R.H.

2.2.2 Evaluation of foxglove aphid control in experimental greenhouse

The banker plant systems consisted of barley plants (*Hordeum vulgare* L.) infested with bird cherry-oat aphids (*R. padi*). Twenty wooden cages (91 X 91 X 61 cm) covered with muslin with a cardboard bottom and 2 doors fastened by hook and loop tape for access to plants were used for the experiment. Tests were separated in two temporal blocks due to space restrictions (one of 8 cages, from January 2016 – February 2016 and the other of 12 cages, from February 2016 – March 2016) and done in an experimental greenhouse at the Université du Québec à Montréal kept at 18°C. In each cage, 24 green pepper plants (*Capsicum annuum* L.) (Var. Aristotle), with 6-8 leaves were placed in 4 rows of 6. Each row was spaced by 20cm and each plant separated by 10cm. Each green pepper plant was inoculated with one apterous adult foxglove aphid. After 24 hours, a banker plant system was introduced in front of the first row of each cage. Banker plant systems were inoculated with about 500 bird cherry-oat aphids at various stages. For treatment cages, 1 male and 1 female adult American hoverfly that had emerged for no more than 24 hours were introduced with the banker plant system as well as an artificial flower which consisted of a round cotton makeup remover saturated with a honey: water mixture (1:2 v/v) and covered with bee pollen. For controls, no hoverflies or artificial flowers were introduced, only the banker plant. Two green pepper plants per row per cage were randomly selected and sampled. From each plant, 2 leaves were randomly selected and aphids present were counted. Leaves were then put back in culture at the foot of the plant from which they were sampled so that population growth wouldn't be affected.

The average number of aphids present per leaf was calculated after 2, 3, 4, 5, and 6 weeks. Green pepper plants were fertilized every two weeks with a fertiliser (20-20-20) and banker plant systems were renewed every week. For all treatment cages (in which hoverflies were introduced into), old banker plants were kept close to those that were introduced weekly. This way any hoverfly eggs, larvae or pupae present on barley

plants or on the soil were kept in the system. After 2, 3, 4, 5, and 6 weeks, a quadrant of 3cm x 3 cm section of each banker plant system was randomly sampled and the number of eggs, larvae and pupae present was counted. The number of adult hoverflies was counted at the end of the 6 weeks in all cages containing banker plant systems. Banker plant systems were kept in plastic cylinders for an additional 3 weeks in order to follow adult emergence. A HOBO® Data Logger was used to measure the temperature inside the greenhouse.

2.2.3 Evaluation of foxglove aphid control in commercial greenhouse

Two commercial greenhouses (27m X 200m) of *Begonia semperflorens* L.cultorum were used in facilities in Mirabel, Quebec. Experiments were carried out at production temperature of 19°C - 20°C for the first week and at a heating set point of 17°C for the following weeks. Tests were done in only half of each greenhouse. The other half was used as a buffer zone between testing area and the rest of the greenhouse complex. Final testing area was 27m X 100m per greenhouse. Banker plant systems and green pepper plants were introduced on March 31, 2016 in the first greenhouse and on April 13, 2016 for the second greenhouse. Banker plant containers were placed directly on ground level. In each greenhouse, 4 banker plant systems were placed along the border of the walking corridor, which was in the center of the culture as recommended in Bribosia et al. (2005) to optimize biocontrol of foxglove aphids. Banker plant systems were the same as the ones used for experiments in the experimental greenhouses except that each plant contained 10 1st stage hoverfly larvae aged less than 24 hours. In addition to the 4 banker plant systems, 10 green pepper plants (20 in total) with 6-8

leaves were introduced randomly in each greenhouse. Five green pepper plants were placed inside wooden cages of 25.4cm X 25.4cm X 60.96cm covered in muslin with a Velcro door (controls) to prevent hoverfly access and follow foxglove aphid populations. The other 5 plants were placed individually in the same type of cages but not covered with muslin (treatments). Artificial flowers were also inserted into each banker plant, as described in the laboratory greenhouse experiments. Each week, a new banker plant system was placed alongside old banker plant systems and 10 adult hoverflies (5 ♂ and 5 ♀) were released close to banker plant systems and artificial flowers. After two weeks we observed predation by ants on syrphid larvae in the first greenhouse. Modifications to protocol to prevent larval predation by ants was to add Tanglefoot® to the sides of banker plant systems and to elevate them on plastic containers also covered with Tanglefoot®. For the second greenhouse, Tanglefoot® was applied immediately after banker plant introduction.

Plants were watered as necessary with a water and fertilizer mixture (20-20-20). For a period of 6 weeks, once a week, the number of live foxglove aphids, hoverfly eggs, larvae and pupae present on green pepper plants was counted. The number of eggs, larvae, and pupae found on banker plant systems and on the soil was also counted. A HOBO® Data Logger was used to measure the temperature inside the greenhouses. Trials finished on May 12, 2016 for the first greenhouse and on May 26, 2016 for the second greenhouse. At the end of trials, each banker plant system left in greenhouses were kept in plastic cylinders in order to collect adult hoverflies emerging over the next 3 weeks in order to confirm that the species was *E. americanus*.

2.2.4 Statistical analyses

For all experiments, statistical analyses were performed with the statistical package JMP® 12 (SAS Institute, 2015).

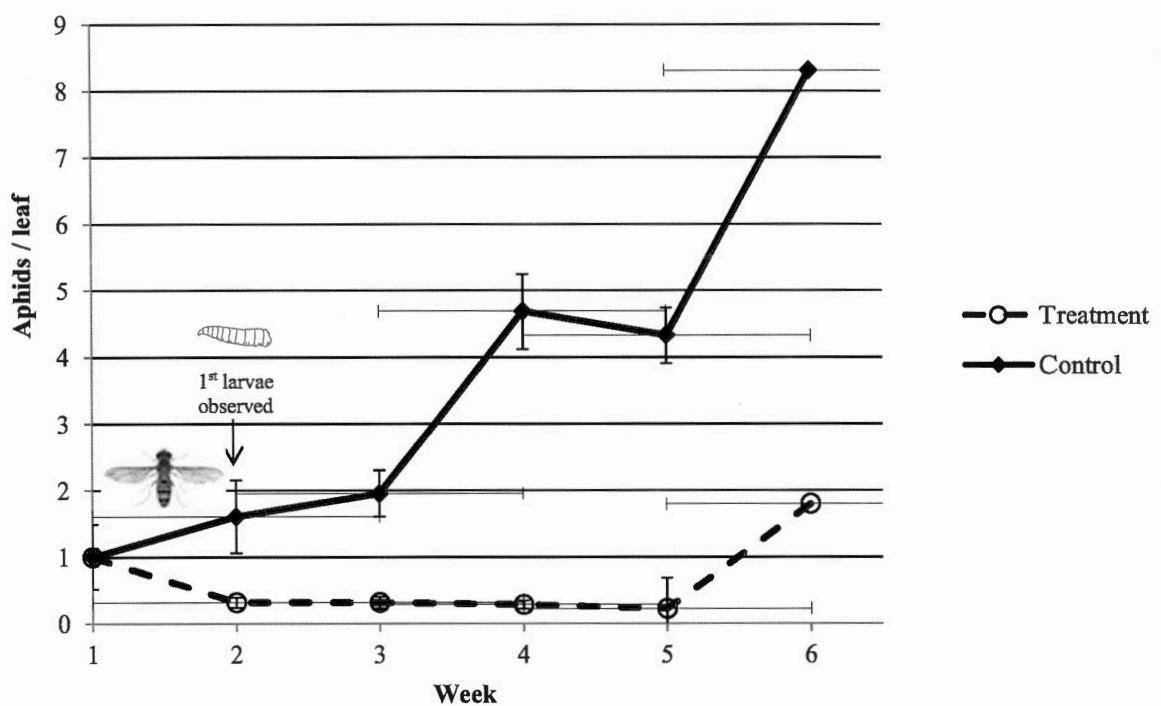
For experiments in experimental greenhouses, a repeated measures ANOVA was used to compare treatment effects on the average number of aphids per cage. The Repeated Measures Full-Factorial design (Mixed Model) was used where the controls were cages without adult hoverflies and treatments were cages with adult hoverflies. For any interactions, contrasts between the control and treatment were done for each week (2-6). Due to triple interactions between time*treatment*repetitions, the slope and intercept were calculated using the estimates given by the Indicator Function Parameterization. Slopes were compared for each block (1 or 2) and treatments (control without hoverflies and treatment with hoverflies). Multiple comparison tests were done to compare block*treatment at the end of testing (week 6). Regressions were also done for the number of adults produced in the system and the number of aphids in cages. For experiments in commercial greenhouses, a one-way ANOVA was used to compare treatment effects on the average number of aphids per cage. A multiple comparison Tukey HSD test was performed to identify treatments that were significantly different from one another.

2.3. Results

2.3.1 Evaluation of foxglove aphid control in experimental greenhouse

The average temperature differed between the two temporal blocks (18.4°C for the first block and 19.5°C for the second block). Figure 2.1 shows the average number of foxglove aphids per cage for each treatment over 6 weeks for both blocks (A and B). Effect of treatment ($P < 0.001$, d.f. = 1, $F = 82.8337$) and weeks ($P < 0.001$, d.f. = 1, $F = 80.3750$) are significant, which was expected. However, the effect of blocks ($P < 0.001$, d.f. = 1, $F = 36.9512$) is also significant.

A) Greenhouse 1 (January – February 2016)



B) Greenhouse 2 (March – April 2016)

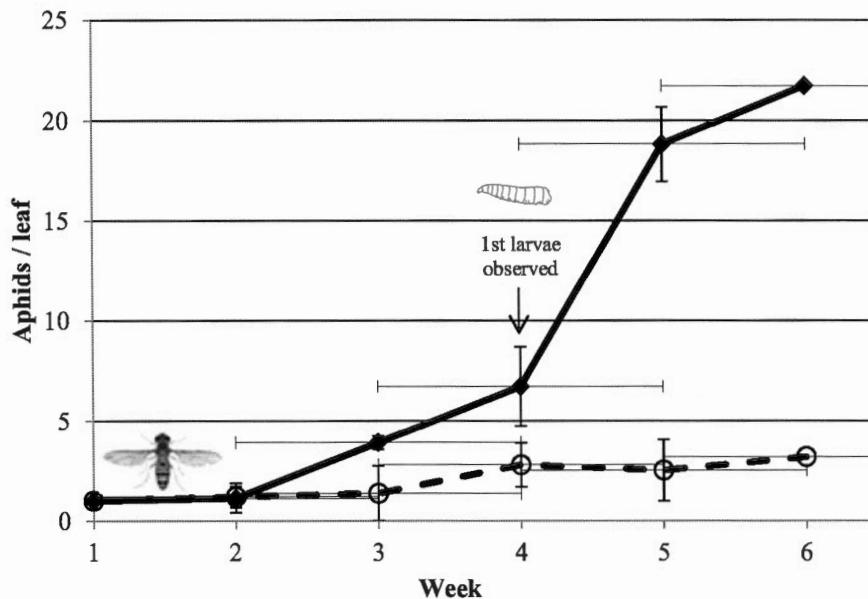


Figure 2.1 Average number of foxglove aphids per green pepper leaf for each treatment over 6 weeks for block 1 (A) and block 2 (B) in experimental greenhouse. Treatments consist of the introduction of a banker plant with the American hoverfly (dashed line) and a banker plant system without introduction of the American hoverfly (control, solid line).

Due to triple interactions, regression slopes were estimated for each treatment and block (Figure 2.2). For block 1*treatment, the slope is positive and significant ($P = 0.0032$, d.f. = 60) meaning there is a significant increase over time in the number of aphids in cages without hoverflies for the first block. For block 1*treatment, the slope is not significant meaning there is no increase or decrease over time for the number of aphids in cages with hoverflies for the first block ($P = 0.5778$, d.f. = 60). The same pattern is observed in the second block. For block 2*treatment, the slope is significant ($P < 0.001$, d.f. = 60) meaning a significant increase over time in the number of aphids in cages without hoverflies for the second block. Finally, for block 2*treatment, the slope is also

not significant ($P = 0.2294$, d.f. = 60), indicating that there is no increase in aphid populations over time in cages with hoverflies. The regression slopes are all significantly different from another when comparing treatments for each block over after 6 weeks of testing ($P < 0.001$, d.f. = 12).

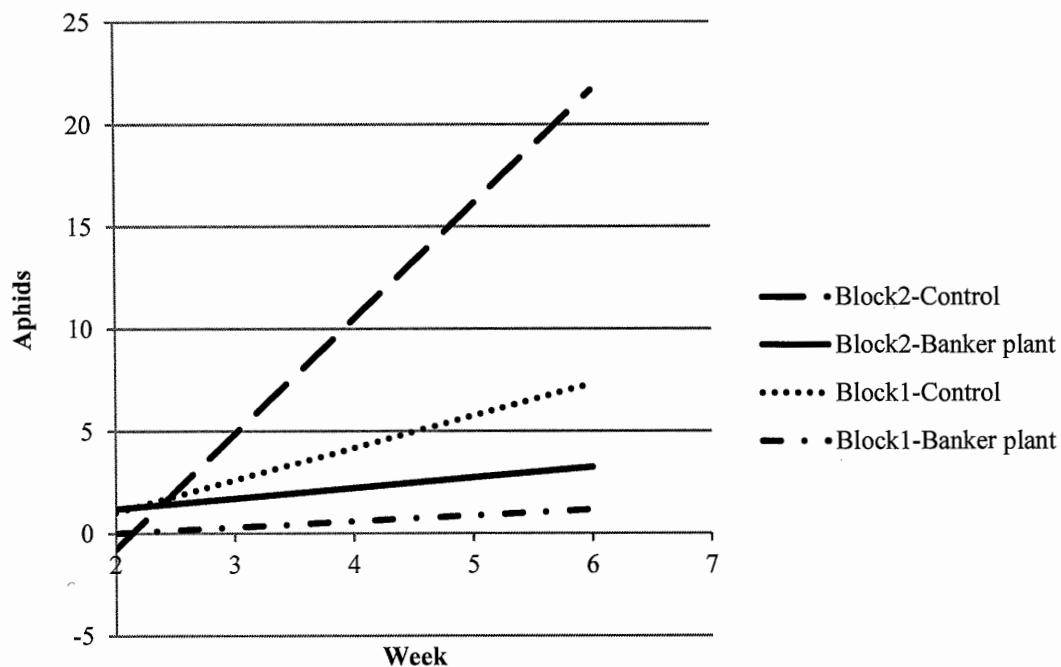


Figure 2.2 Average number of aphids per cage for each treatment in experimental greenhouses over 6 weeks for block 1 (Control*Banker plant, $p < 0.0001$) and block 2 (Control*Banker plant, $p < 0.0001$). Regression slopes for each block and treatment were determined following an ANOVA indicating a significant triple interaction between blocks, weeks, and treatments.

Results show that the American hoverfly can successfully reproduce on banker plants. With only a small banker plant and only 2 adult individuals (one male and one female)

at the beginning of testing, some treatment cages had produced up to 49 adult American hoverflies after 6 weeks, with a total of 264 adults for all treatment cages.

2.3.2 Evaluation of foxglove aphid control in commercial greenhouse

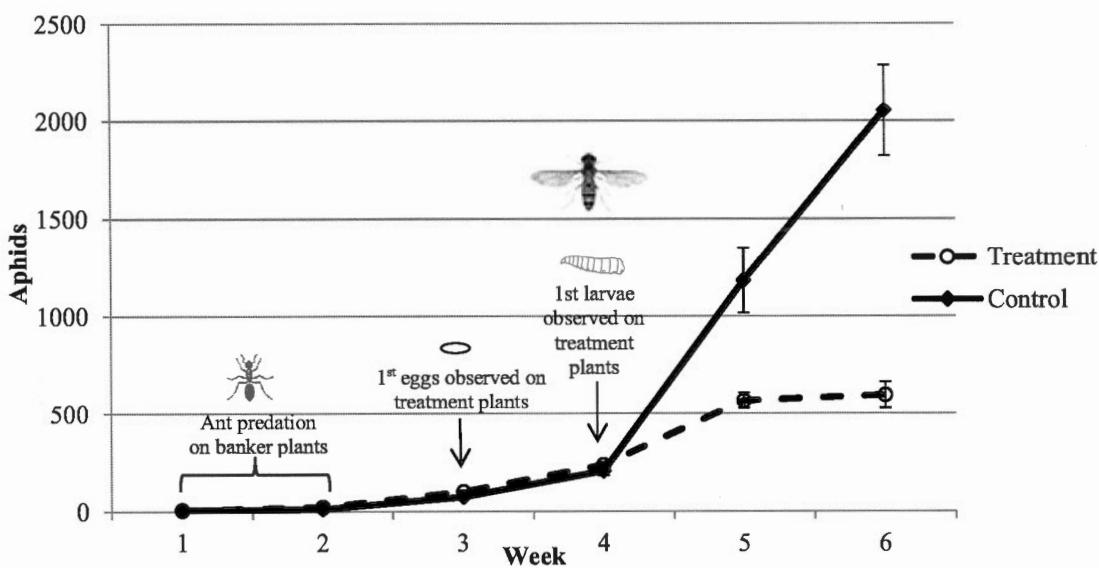
The average temperature in the first greenhouse was 18.01°C from April 7, 2016 to May 12, 2016 and 18.94°C in the second greenhouse from April 21, 2016 to May 26, 2016. For the first greenhouse, the first immature stage of *E. americanus* was observed at week 3 (1 larva) on one of the green pepper plants that had access to the banker plant systems (treatment; Figure 2.3A). This is due to ant predation on hoverfly larvae. For the second greenhouse, the first immature stages of *E. americanus* were observed at week 3 (10 eggs) on the green pepper plants (treatment; Figure 2.3B).

Within the first greenhouse, in order to prevent ant predation for the subsequent weeks of testing, measures were taken at week 3 to prevent additional predation (as described above in the materials and methods section). At the end of testing (6 weeks), for the first greenhouse, there was on average 596.2 aphids on green pepper plants inside treatment cages (not covered in muslin) and 2054.6 aphids on green pepper plants inside control cages (covered in muslin). The average number of aphids found on green pepper plants was significantly lower for treated cages (not covered by muslin) when compared to controls (covered in muslin) ($F_{3, 8} = 10.524, P = 0.0038$).

At the end of the trial for the second greenhouse, there was on average 1131.2 aphids on green pepper plants inside control cages and 11 aphids on green pepper plants inside treatment cages (with hoverfly access). No foxglove aphids were found on 3 of the 5

treatment cages and the other treatments had low aphid densities (51 and 4 aphids) compared to control cages which had up to 2288 aphids. The average number of aphids found on green pepper plants after 6 weeks was also significantly lower ($F_{3,8} = 7.0276$, $P = 0.0124$) than those inside control cages. Finally, the American hoverfly showed that it can successfully reproduce on banker plants in commercial greenhouses. After 6 weeks, there were a total of 118 adults produced by 8 banker plants.

A)



B)

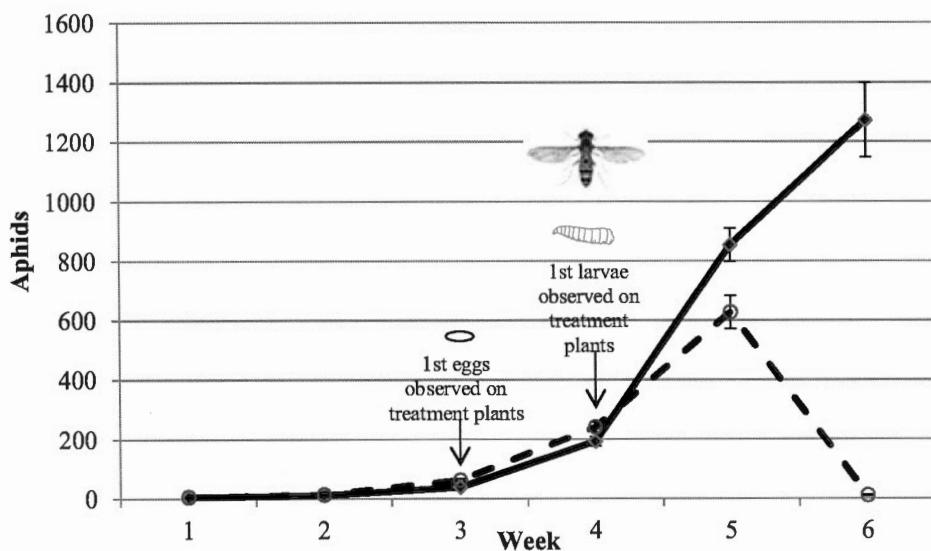


Figure 2.3. Average number of aphids per green pepper plant over 6 weeks in (A) commercial greenhouse 1 (April – May 2016) and (B) commercial greenhouse 2 (April 2016 – May 2016). Treatments were non-caged green pepper plants (dashed line) and caged green pepper plants (control, solid line). Treatments were exposed to oviposition by hoverflies produced by banker plant systems introduced in greenhouses. Ant predation events on banker plants are represented by a bracket and the first noted appearance of eggs and larvae on treatments are represented by arrows.

2.4 Discussion

Our two hypothesis stated first that the banker plant system will allow oviposition and growth of the American hoverfly, and second that a banker plant system using the American hoverfly will be effective to control foxglove aphid populations at low temperatures in both experimental greenhouses (small environment) and commercial greenhouses (large environments) are supported by our results. None of the aphid populations exposed to banker plant systems using barley plants and bird cherry-oat

aphids along with the American hoverfly showed a significant increase over time. In fact, in one of the commercial greenhouses, aphid populations exposed to banker plant systems were almost completely annihilated after 6 weeks.

First, our results confirm that hoverflies effectively oviposit and complete their development on banker plant systems and that *Rhopalosiphum padi* constitutes a good alternative host for this biocontrol agent. The first reference to the potential of predatory hoverflies in greenhouses was done by Erasmus Darwin (1800), Charles Darwin's grandfather. In experimental greenhouse trials, the decrease in aphids is correlated with the presence of adult hoverflies produced by banker plant systems in cages for block 1 only. As for the commercial greenhouse trials, the side doors were opened for ventilation which could have resulted in hoverflies escaping. Even with the side doors open, they remained in the greenhouse long enough to develop mature eggs and oviposit on green pepper plants. After 6 weeks, 118 adults were collected from the banker plant systems used in the commercial greenhouses. For future studies, hoverfly residence times should be evaluated based on aphid density in the culture.

Despite the excellent results with the bird cherry-oat aphid (*R. padi*), it may not constitute the optimal host for the American hoverfly or lead to the most efficient control of pest populations over time. The bird cherry-oat aphid can also attack other ornamental grasses so its use for a banker plant system might not be desirable in certain cultures such as ornamental greenhouses, but could be used in market gardening greenhouses. That being said, further research should be carried on to evaluate other aphid species that could be used for banker plant systems in market gardening greenhouses, according to the nutritional value for the syrphid and the potential risk for the focal crop (Meyling et al., 2003). In fact, a similar study done by Van Driesche et al. has suggested that parasitoids such as *Aphidius colemani* respond to both the type of aphid used as well as the banker plant on which they must forage for aphids (Van

Driesche et al., 2008). So, the focus would not only be on the alternative aphid species used for the banker plant but also on the plant selected for proper reproduction of the biological agent and additional food sources (in this case of the alternative aphid).

In experimental greenhouses, foxglove aphid densities were reduced in cages with banker plant systems and hoverflies. Populations did not increase over time whereas in the controls, it rapidly increases from week to week. For instance, there was a 3 fold increase for the average number of aphids found per leaf after 3 weeks. In experimental greenhouse trials, aphid populations were lower in cages with banker plant systems when compared to those with none (controls). After 6 weeks, there was a decrease of 29.02% of aphids in greenhouse 1 and a decrease of 97.24% in greenhouse 2. It is clear that hoverfly presence hinders growth of aphid populations and reproduce under artificial lighting. For the experimental greenhouse tests, population of aphids and hoverflies were significantly greater in the second block when compared to the first which could be due to differences in temperature, better growth of plants, or light quality. Growth and reproduction of both aphids and hoverflies may have been accelerated, as shown in the difference in regression curves of both blocks and between population numbers in cages. Nevertheless, it is interesting to note that banker plant systems were efficient in different temperature conditions.

For commercial greenhouse trials, slower results in greenhouse 1 are explained by ant predation. Ants have been shown to exert predatory pressure on the first instars of hoverflies (Detrain et al., 2017) and have been observed to bite and carry larvae to the nest (Rathcke et al., 1967). Due to the presence of ants at week 1, larvae found on banker plant systems in greenhouse 1 at weeks 2 and 3 were fewer and no larva was found at week 1. This delay explains the differences in aphid numbers when comparing greenhouse 1 and 2. A prolongation of the experiment for an additional 2 weeks, may have product final aphid populations relatively similar between the 2 greenhouses. The

hoverflies reared on the banker plants were responsible for the oviposition recorded on green pepper plants. The control was achieved, not by the released of adult syrphids but rather by individuals recruited from the banker plant systems since the released hoverflies did not lay eggs (not useful for biological control). Such results have also been shown by Pineda and Marcos-García, in a study done in four sweet-pepper commercial greenhouses in the southeast of Spain. Findings show that banker plant systems were effective in attracting natural populations of hoverflies but that when *E. balteatus* were released, they did not remain in greenhouses long enough to lay eggs (Pineda and Marcos-García, 2008b).

Considering hoverflies as biocontrol agent, it should be mentioned that *E. balteatus* is among the top 25 most important biocontrol agents used in augmentative biological control, and is the only syrphid species commercially available worldwide, while *Sphaerophoria rueppellii* has been effective on Mediterranean greenhouse crops (Arcaya et al., 2017). A similar study was done by Pineda and Marcos-García in Mediterranean sweet pepper greenhouses where the efficiency of releases of immature *Episyrrhus balteatus* (Diptera: Syrphidae) was tested. Results showed that abundance varied between greenhouses and that the release methodology of introducing pupae appears not to be effective in Mediterranean glasshouses (Pineda and Marcos-García, 2008a). In fact, a previous study in a laboratory showed the potential of the American hoverfly as a promising biocontrol agent at low temperatures against the foxglove aphid on green pepper plants (Bellefeuille et al., 2018).

The present study is the first demonstration of how banker plant systems using barley and *R. padi* may be used in commercial greenhouses with the American hoverfly against the foxglove aphid at low temperatures. For future use, banker plant systems could be introduced a few weeks before foxglove aphids appear in the crop, with older larval stages or pupae and not with adults. This way, hoverfly populations will establish

themselves in the crop before aphid populations become too high. The biology of the American hoverfly is poorly known, which shows the importance of studying for example the oviposition threshold for the predator. In the present study, we observed eggs after the 3rd week on the green pepper plants and larvae after the 4th week of testing. By then, aphid densities may be considered too high for some producers. It would also be important to conduct trials in green market cultures with banker plants hung from greenhouse ceilings to prevent ant predation and look at the differences between using a higher number of smaller banker plants vs. a lower number of larger banker plant system (Van Driesche et al., 2008). Further research would also include looking at the synchronisation between foxglove aphid and the hoverfly populations (or other biological control agents) to determine the best time for hoverfly introduction into the system.

The system used in this study could be used in ornamental horticulture but there could be challenges, since *R. padi* can attack monocotyledon ornamental grasses such as finger millet (*Eleusine coracana* L.), rough bluegrass (*Poa trivialis* L.), and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) (Huang et al., 2011). However, it should be evaluated in sweet pepper or tomato greenhouses against *M. persicae*, or in cucumber greenhouses against *A. gossypii* (Chambers, 1986). We would need to find another alternative aphid for the banker plant system to prevent aphid damage to focal plants, should it be used in other market gardening cultures.

Finally, this study explores the use of new potential biological control agents. In fact, only a small proportion of species that has a good potential as biological control agents have been studied. For example, Sloggett (2005) showed that 69% of the published research studies on coccinellids have been concentrated on only 5 species (over 4000 spp.) of aphidophagous ladybirds and that there has been an issue of taxonomic bias (Sloggett, 2005). We then strongly support studies (such as the present one) on

new potential biocontrol agents, not commercialized as we don't take advantage of the available natural diversity, whether it is specific diversity (for example Barriault 2018a, 2018b), genetic diversity (Dumont et al., 2015) or ecosystemic diversity (Maisonhaute et al., 2010).

2.5 Acknowledgements

We would like to thank Caroline Martineau, Émilie Lemaire, and Benoit Champagne from the “*Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale*” (IQDHO) and Dominic Périn from “*Les Serres Cléroux*”. We would also like to thank Sylvain Dallaire, the entire team from the “*Laboratoire de lutte biologique*”, and Jill Vandermeerschen for statistical advice. Funding: This work was supported by the “*Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec*”, Québec, QC, Canada (UQAM 1-13-1652).

CONCLUSION

Cette étude avait comme objectif d'évaluer le potentiel de deux nouveaux agents de lutte biologique contre le puceron de la digitale et de développer un système de plante réservoir à basse température en serre commerciale maraîchère. Nous avons évalué la capacité de vol, de ponte et de voracité larvaire de l'eupéode d'amérique et de la la chamémyie glyphinivore. Nous avons par la suite évalué l'efficacité d'un système de plante réservoir en serre expérimentale et commerciale avec le meilleur agent de lutte biologique. Nos hypothèses étaient que l'eupéode d'Amérique serait plus efficace que la chamémyie glyphinivore à basse température (12, 15 et 18°C) et que le système de plante réservoir en combinaison avec l'eupéode d'Amérique améliorerait le niveau de contrôle du puceron de la digitale en serre.

Les résultats démontrent effectivement que l'eupéode d'Amérique est plus performant que la chamémyie glyphinivore à basse température. Sa capacité de vol, de ponte et sa voracité larvaire restent adéquates à 12°C, 15°C et 18°C et supérieures à celles de la chamémyie. Il est important d'ajouter que l'impact de la prédation des larves, lorsqu'on considérait les degrés-jours accumulés par le puceron restait similaire quelle que soit la température. Ainsi, l'eupéode d'Amérique démontre un excellent potentiel comme agent de lutte biologique à basse température.

Enfin, ce projet a démontré l'efficacité de l'utilisation d'un système de plante réservoir en serre maraîchère à basse température avec l'eupéode d'Amérique contre le puceron de la digitale. Il n'y a aucun syrphe commercialement vendu en Amérique du nord et puisque l'eupéode d'Amérique est un agent efficace à basse température, c'est un

candidat idéal pour des systèmes de plantes réservoir parce qu'il peut s'établir très tôt avant l'arrivée de la plupart des pucerons ravageurs. Nos résultats montrent que l'eupéode se reproduit très bien sur les plantes réservoir et les adultes issus de ces plantes réservoir vont ensuite pondre dans la serre. Également, en raison de la perturbation du contrôle biologique des pucerons par les fourmis, nous avons développé une méthode efficace pour protéger nos plantes réservoir. Pour des études futures, il serait important de maintenir les systèmes de plante réservoirs avec larves de syrphes à l'abri des fourmis pour assurer l'efficacité de ces systèmes en serre.

Globalement nous avons démontré que l'eupéode d'Amérique peut voler, pondre attaquer les pucerons à basses température et que l'eupéode peut contrôler efficacement le puceron de la digitale à basse température en serre. Nous avons également démontré l'efficacité d'un système de plante réservoir en serre expérimentale et commerciale avec l'eupéode d'Amérique. Les résultats les plus marquants montrent que la voracité larvaire de l'eupéode d'Amérique à 75 degrés-jour accumulés pour les pucerons est similaire, peu importe la température. Donc on est en droit de s'attendre à un impact aussi bon à 12°C, 15°C ou 18°C. Des recommandations pour des pistes de recherche dans le futur seraient de faire des essais similaires dans des cultures autres que de poivrons ou de bégonias. Ces tests pourraient également être faits avec un puceron alternatif autre que *R. padi* pour le système de plante réservoir, afin de voir s'il y a une meilleure reproduction de l'agent de lutte biologique et un meilleur contrôle du puceron s'attaquant à la culture. Ces pucerons alternatifs pourraient être le puceron des épis de céréales, *Sitobion avenae* Fabricius (Hemiptera : Aphididae) ou le puceron vert du maïs, *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Hemiptera : Aphididae). En culture céralière, ou en serres ornementales, il faudrait utiliser un puceron autre que *R. padi* pour le système de plante réservoir, qui ne s'attaque pas aux graminées ornementales. Pour l'aspect de ponte de l'eupéode d'Amérique, il serait avantageux de faire des tests sur le seuil

minimal de ponte du prédateur avec différentes densités de pucerons. Ces tests permettraient d'établir quelle serait la densité de pucerons nécessaire pour une ponte optimale, selon la température.

Nous pourrions étendre cette méthode dans d'autres systèmes contre d'autres ravageurs. Un des systèmes qui pourrait bénéficier de cette étude serait en serre maraîchère, par exemple dans des cultures de laitue, de poivron, ou de concombre à haute température avec d'autres cibles comme le puceron du melon, *Aphis gossypii* Glover (Hemiptera : Aphididae) ou le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera : Aphididae). Par contre, il resterait beaucoup d'éléments à étudier, tel la rétention des prédateurs dans le système, le puceron utilisé pour le système de plante réservoir, et la plante hôte. Cette méthode pourrait également être utilisée dans des systèmes hors serres comme sur le terrain (près des serres) ou être couplée avec d'autres agents de lutte biologique.

Les résultats de notre étude touchent à plusieurs problématiques dont l'utilisation de pesticides, le manque d'exploitation de la diversité naturelle qui nous est offerte (spécifique, génétique et écosystémique) pour la lutte biologique et les problèmes liés au manque d'information et de méthodes de lutte contre le puceron de la digitale à basse température. Il faut également considérer les obstacles à la croissance de l'industrie des agents de lutte biologique commerciaux tels que : le coût élevé de développement de nouveaux agents de lutte biologique dû aux coûts de régulation d'importation, et le faible taux d'adoption d'agents de lutte biologique commerciaux en raison du manque d'accès à l'information.

Finalement, cette étude s'inscrit dans un vaste programme visant à développer de nouveaux agents de lutte biologique. L'objectif final est donc la commercialisation d'un nouvel agent de lutte aphidiphage, différent des autres. Optimiser l'élevage

devient alors primordial afin de réduire les coûts, mais il y aurait également plusieurs aspects à étudier avant la commercialisation d'un tel système tel que la distribution, l'entreposage, les processus de diapause, le coût pour la production de masse, la valeur marchande et son efficacité en agriculture commerciale.

APPENDICE A

ARTICLE PUBLIÉ À L'ORGANISATION INTERNATIONALE DE LUTTE BIOLOGIQUE (OILB)

Integrated Control in Protected Crops, Temperate Climate
IOBC-WPRS Bulletin Vol. 124, 2017
pp. 62-66

***Eupeodes americanus* and *Leucopis annulipes* as potential biocontrol agents of the Foxglove Aphid at low temperatures.**

Ymilie Bellefeuille¹, Marc Fournier¹ and Eric Lucas¹

¹Laboratoire de Lutte Biologique, Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal (UQAM), C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec H3C 3P8, (Canada.)

Abstract: The foxglove aphid, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae), has become a significant pest in ornamental horticulture as it can build high populations at low temperatures from 10-18°C. Currently, only chemical control is used, as no commercially available biological control agent is effective at these temperatures. Two new potential biocontrol agents were evaluated in the laboratory at low temperatures: the silverfly, *Leucopis annulipes* Zetterstedt (Diptera: Chamaemyiidae) and the American hoverfly, *Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann) (Diptera: Syrphidae). Active flight, oviposition and larval voracity were evaluated at 12°C, 15°C and 18°C. The number of eggs laid by females was calculated after 7 days (18°C, 15°C, and 12°C) and 14 days (12°C). The number of aphids consumed by larvae was determined after 8 days and 8 hrs. (12°C), 6 days and 6 hrs. (15°C) and 5 days (18°C). Results indicated that hoverflies laid a significantly higher number of eggs than silverflies at all temperatures. When given an additional 7 days at 12°C, oviposition increased for both species. Hoverfly larvae consumed 2 times more aphids than silverfly larvae

at 12°C, 15°C and 18°C. Globally, the present study demonstrates a clear superiority of the hoverfly over the silverfly at low temperatures, and identifies it as a potential biocontrol agent of the foxglove aphid.

Keywords: Syrphidae, Chamaemyiidae, biological control, *Aulacorthum solani*, greenhouses

Introduction

The foxglove aphid, *Aulacorthum solani* Kaltenbach (Hemiptera: Aphididae) is a growing problem in horticulture (Jandricic et al., 2014). Agricultural production in North-eastern America starts in January and February. The temperature in greenhouses is kept low in order to save on heating costs (University of Minnesota's Center for Urban and Regional Affairs and Center for Sustainable Building Research, 2013). Contrary to other species of aphids, *A. solani* has a high fecundity at 5°C, 10°C, and 20 °C, where few natural enemies are effective (Jandricic et al., 2010). There is no current biological control agent commercially available for use at low temperatures (10°C to 20°C) against the foxglove aphid (Schüder et al., 2004; Katsarou et al., 2005; Alotaibi, 2008; Lee et al., 2008; Jalali et al., 2010; Jandricic, 2013). Insecticides currently used against aphids in Canada on ornamental crops include Intercept™ 60 WP (imidacloprid) and Endeavor® 50 WG (pymetrozine) (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2014).

The Nearctic *Eupeodes (Metasyrphus) americanus* (Wiedemann) (Diptera: Syrphidae) is a generalist aphid predators (Rojo et al., 2003). The biology of *E. americanus* is poorly known, however other syrphids that prey upon aphids are active early in the spring and late in the fall; when temperatures are low (Dixon et al., 2005; Tamaki et al., 1967). This is consistent with the thermal development threshold of other syrphid species, which is between 5 and 7°C (Hart et al., 1997; Honěk and Kocourek, 1988). The second potential biocontrol agent, the silverfly, *Leucopis annulipes* Zetterstedt (Diptera: Chamaemyiidae) consumes many species of aphids (Satar et al., 2015) and live within the colony without eliciting defensive responses from their prey (Fréchette et al., 2008).

The aim of the present study was to assess the potential of two new biological control agents, the American hoverfly and the silverfly for the repression of *A. solani*. To achieve this, active flight, female oviposition and larval voracity for both predators were evaluated and compared at low temperatures.

Materials and Methods

Insect rearing

All insect rearings were carried out at the Université du Québec à Montréal (UQÀM) in the Laboratoire de Lutte Biologique. Foxglove aphids (*Aulacorthum solani*) were reared on green pepper plants, *Capsicum annuum* L. (Solanaceae) (18°C, 16L: 8D photoperiod and 60% R.H.). Hoverfly (*Eupeodes americanus*) rearings were based on the Frazer method (Frazer, 1972). Adults were reared in controlled conditions (22°C during the day, 19°C at night and 60 % R.H.). Eggs were collected and kept in Petri dishes at 4°C, 60% R.H. Larvae were reared on green peach aphids, *Myzus persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae). Silverfly (*Leucopis annulipes* Zetterstedt) were reared on potato plants inoculated with *M. persicae* following Gaimari and Turner (1996) methodology and kept in the same growth chamber as hoverflies.

Active flight capacity experiment

Active flight capacity for the American Hoverfly and Silverfly was studied at 12, 15, and 18°C. A minimum of 16 males and 16 females of each species aged of 18 to 36 hours at the beginning of the test were individually placed in the center of a Plexiglas® box which was placed in a Conviron™ growth chamber at 700 LUX and 60% R.H. Insects were given a 30 minutes acclimation period before starting the tests and each individual was observed for a period of 10 minutes. The presence or absence of active flight, as well as the delay from introduction of the insect in the box to the observation of active flight, was noted.

Egg-laying experiment

The number of eggs laid by American hoverfly and silverfly females was measured at 12°C, 15°C, and 18°C. Twenty females and twenty males from each species, aged less than 24hrs were collected from the colony established in the laboratory. One male and one female were introduced in a transparent plastic cylinder containing a green pepper plant with 6 to 8 leaves inoculated with 200 foxglove aphids of different stages. Cylinders were placed in a growth chamber for 7 days at 12, 15, and 18°C and 14 days at 12°C, 16L: 8D, 50% R.H. Tests were repeated at 12°C for 14 days to account for prolongation of egg maturation. The number of eggs laid as well as the number of larvae on the plant was counted at the end of each trial.

Larval voracity experiment

The number of aphids consumed by American hoverfly and silverfly larvae was calculated at 12, 15, and 18°C, 16L: 8D, 50% R.H. Green pepper plants were placed in the same type of cylinders described earlier for the egg-laying tests. Thirty 2nd instar foxglove aphids were placed on each green pepper plant. The treatment consisted of the introduction of a stage I American hoverfly larva or silverfly larva. A control was carried out without predators. Cylinders were put inside a Conviron™ growth chamber

for 5 days at 18°C, 6 days and 6 hours at 15°C, and 8 days, 8 hours at 12°C. At the end of each test, the number of living aphids was calculated as such: initial density (30 aphids) - number of living aphids. If a larva was feeding on an aphid at the moment of data collection, it was considered as dead. Daily consumption was also calculated: total consumption/ duration of the test according to the temperature tested for.

Data analysis

Statistical analyses were performed with the statistical package JMP® 12 (SAS Institute, 2015). All experiment variables were analyzed by a two-way ANOVA and a Tukey's HSD test was used to identify treatments that were significantly different from each other.

Results and discussion

Delays before active flight (in seconds) varied according to all 3 temperatures for *E. americanus* ($F_{2,141} = 15.6$, $P < 0.0001$, $\mu_{18} = 59.1$ s., $\mu_{15} = 110.1$ s., $\mu_{12} = 210.6$ s.) and *L. glyphinivora* ($F_{2,64} = 18.8$, $P < 0.0001$, $\mu_{18} = 60.6$ s., $\mu_{15} = 81.69$ s., $\mu_{12} = 387.3$ s.). No significant difference was observed between the two species at 12°C ($F_{2,201} = 11.5$, $P = 0.5673$), 15°C ($F_{2,201} = 11.5$, $P = 0.6306$), and 18°C ($F_{2,201} = 11.5$, $P = 0.9999$). However, all *Eupeodes americanus* demonstrated active flight at 18°C, 88.7% could fly at 15°C, while only 14.5% could fly at 12°C. For *L. annulipes*, 88.7% demonstrated active flight at 18°C, 24.1% at 15°C, and 7.8% at 12°C.

In the egg-laying trial, the average number of eggs laid by *E. americanus* ($\mu_{18} = 113$, $\mu_{15} = 46.9$, $\mu_{12} = 11.6$) was significantly greater than *L. glyphinivora* ($\mu_{18} = 2.09$, $\mu_{15} = 1.18$, $\mu_{12} = 0$) after 7 days ($F_{2,223} = 84.73$, $P < 0.0001$) and 14 days at 12°C ($F_{2,51} = 53.12$, $P < 0.0001$, $\mu = 101$ for the hoverfly and $\mu = 1.33$ for the silverfly). When given an additional 7 days (14 days in total), the average number of eggs laid at 12°C went from 0 to 1.33 eggs for the silverfly and from 11.6 eggs to 101 eggs for the hoverfly. This is the first study that examines female oviposition performance at low temperatures for *E. americanus*.

Average daily aphid consumption was at least 2 times greater for the hoverfly larvae ($\mu_{18} = 4.54$, $\mu_{15} = 3.65$, $\mu_{12} = 2.80$) when compared to the silverfly ($\mu_{18} = 1.27$, $\mu_{15} = 1.05$, $\mu_{12} = 0.88$) ($F_{2,235} = 175.55$, $P < 0.0001$). Daily aphid consumption was significantly greater for the hoverfly when compared to the silverfly at 18°C, and 12°C ($F_{2,235} = 235.05$, $P < 0.0001$). Total aphid consumption was significantly greater for the hoverfly ($\mu_{18} = 22.7$, $\mu_{15} = 22.8$, $\mu_{12} = 23.3$) when compared to the silverfly ($\mu_{18} = 6.35$, $\mu_{15} = 6.59$, $\mu_{12} = 7.29$) at 18°C, 15°C, and 12°C ($F_{2,235} = 222.38$, $P < 0.0001$).

According to what occurs in most invertebrates, performances of both *E. americanus* and *L. annulipes* were negatively affected at low temperatures. However, while *L. annulipes* is clearly not an adequate biological control agent against the

foxglove aphid at low temperatures, the American hoverfly demonstrated a high potential against the target aphid and may be considered for commercialization. This is the first study to look at the efficiency of the American hoverfly against the foxglove aphid in terms of active flight, oviposition, and voracity at low temperatures. Finally, this study may contribute to the commercialization of a new biological control agent and the reduction of pesticide use (Frank, 2010).

Acknowledgements

We would like to thank the entire team from the “*Laboratoire de lutte biologique*”, Sylvain Dallaire for his technical assistance, and Jill Vandermeerschen for her assistance with data analysis. This research was funded by the “*Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec*” (Québec, QC, Canada); and the “*Institut québécois du développement de l’horticulture ornementale*” (Québec, QC, Canada). Finally, we would like to thank Dr. S.D. Gaimari, California Department of Food and Agriculture, for *Leucopis glyphinivora* identification and rearing advice.

References

- Alotaibi, S., 2008. Mass production and utilization of the predatory midge, *Aphidoletes aphidimyza* Rondani for controlling aphids. Global J. Biotech. Biochem. 3: 1-7.
- Dixon, A.F.G., Jarošík, V., Honěk, A., 2005. Thermal requirements for development and resource partitioning in aphidophagous guilds. Eur. J. Entomol. 102: 407-411.
- Frank, S.D., 2010. Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. Biol. Control. 52: 8-16.
- Frazer, B.D., 1972. A simple and Efficient Method of Rearing Aphidophagous Hoverflies (Diptera: Syrphidae). J. Entomol. Soc. B. C. 69: 23-24.
- Fréchette, B., Larouche, F., Lucas, E., 2008. *Leucopis annulipes* larvae (Diptera: Chamaemyiidae) use a furtive predation strategy within aphid colonies. Eur. J. Entomol. 105: 399-403.
- Gaimari, S.D., Turner, W.J., 1996. Methods for Rearing Aphidophagous *Leucopis spp.* (Diptera: Chamaemyiidae). J. Kans. Entomol. Soc. 69: 363-369.
- Hart, A.J., Bale, J.S., Fenlon, J.S., 1997. Developmental threshold, day-degree requirements and voltinism of the aphid predator *Episyphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). Ann. Appl. Biol. 130: 427-437.
- Honěk, A., Kocourek, F., 1988. Thermal requirements for development of aphidophagous *Coccinellidae* (Coleoptera), *Chrysopidae*, *Hemerebiidae* (Neuroptera), and *Syrphidae* (Diptera): some general trends. Oecologia. 76: 455-460.

- Jalali, M.A., Tirry, L., De Clercq, P., 2010. Effect of temperature on the functional response of *Adalia bipunctata* to *Myzus persicae*. BioControl. 55: 261-269.
- Jandricic, S. E., Wright, S.P., Bennett, K.C., 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. Environ. Entomol. 39: 1631-1642.
- Jandricic, S.E., 2013. Investigations of the biology of the pest aphid *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) (Hemiptera: Aphididae) and of biological control agents for control of multi-species aphid outbreaks in greenhouse floriculture crops (Doctoral Dissertation). Cornell University, 1-260.
- Jandricic, S.E., Mattson, N.S., Wright, S.P., Sanderson, J.P., 2014. Within-Plant Distribution of *Aulacorthum solani* (Hemiptera: Aphididae), on Various Greenhouse Plants with Implications for Control. J. Econ. Entomol. 107: 697-707.
- Katsarou, I., Margaritopoulos, J.T., Tsitsipis, J.A., Perdikis, D.Ch., Zarpas, K.D., 2005. Effect of temperature on development, growth, and feeding of *Coccinella septempunctata* and *Hippodamia convergens* reared on the tobacco aphid, *Myzus persicae nicotianae*. BioControl. 50: 565-588.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2014. Guide to Greenhouse Floriculture Production, publication 370, Toronto, Canada.
- Radenković, S., Schweiger, O., Milić, D., Harpke, A., Vujić, A., 2017. Living on the edge: Forecasting the trends in abundance and distribution of the largest hoverfly genus (Diptera: Syrphidae) on the Balkan Peninsula under future climate change. Biological Conservation, 212: 216-229.
- Raspi, A., 1996. *Thaumatomyia elongatula* (Becker) (Chloropidae) and *Leucopis annulipes* Zetterstedt (Chamaemyiidae): Two Diptera Preying on *Phloeomyzus passerinii* (Signoret) (Homoptera: Phloeomyzidae) in Italy. Proc. Entomol. Soc. Wash. 98: 509-516.
- Rojo, S., Gilbert, F., Marcos-García, M.A., Nieto, J.M., Mier Durante, M.P., 2003. A world review of predatory hoverflies (Diptera, Syrphidae: Syrphinae) and their prey. Alicante, Spain: Centro Iberoamericano de la Biodiversidad (CIBIO) Ediciones, Universidad de Alicante.
- Satar, S., Raspi, A., Özdemir, I., Tusun, A., Karacaoğlu, M., Benelli, G., 2015. Seasonal habits of predation and prey range in aphidophagous silver flies (Diptera Chamaemyiidae), an overlooked family of biological control agents. B. Insectol. 68: 173-180.
- Schüder, I., Hommes, M., Larink, O., 2004. The influence of temperature and food supply on the development of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). Eur. J. Entomol. 101: 379-384.
- Tamaki, G., Landis, B.J., Weeks, R.E., 1967. Autumn populations of green peach aphid on peach trees and the role of syrphid flies in their control. J. Econ. Entomol. 60: 433-336.

University of Minnesota Center for Urban and Regional Affairs and Center for Sustainable Building Research, 2013. Cold Climate Greenhouse Resource: A guidebook for designing and building a cold-climate greenhouse. The Regents of the University of Minnesota. USA.

RÉFÉRENCES

- Abraham, R. (1975). Über die Wirkung der Temperatur auf die Flugaktivität parasitischer Hymenopteren. *Journal of Applied Entomology*, 79, 113-123.
- Agriculture and Agri-Food Canada (2017). Crop Profile for Greenhouse Pepper in Canada, 2011. Récupéré le 3 février 2015 de http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/aac-aafc/A118-10-21-2013-eng.pdf
- Alberta Agriculture and Rural Development (2002). Pest and Disease Management in Commercial Greenhouses. Récupéré le 19 février 2015 de [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/opp4525](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/opp4525)
- Almohamad, R., Verheggen, F.J. et Haubrige, É. (2009). Searching and oviposition behaviour of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae): a review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment.*, 13(3), 467-481.
- Alotaibi, S. (2008). Mass production and utilization of the predatory midge, *Aphidoletes aphidimyza* Rondani for controlling aphids. *Global Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 3(1), 1-7.
- Amorós-Jiménez, R., Pineda, A., Fereres, A. et Marcos-García, M.A. (2012). Prey availability and abiotic requirements of immature stages of the aphid predator *Sphaerophoria rueppellii*. *Biological Control*, 63(1), 17-24.
- Andorno, A.V. et López, S. N. (2014). Biological control of *Myzus persicae* (Hemiptera:Aphididae) through banker plant system in protected crop. *Biological Control*, 78, 9-14.
- Arcaya, E., Pérez-bañón, C., Mengual, X., Zubcoff-vallejo, J.j. et Rojo, S. (2017). Life table and predation rates of the syrphid fly *Allotropia exotica*, a control agent of the cowpea aphid *Aphis craccivora*. *Biological Control*.

- Avery, P.B., Kumar, V., Xiao, Y., Powell, C.A., McKenzie, C.L. et Osborne L.S. (2014). Selecting an ornamental pepper banker plant for *Amblyseius swirskii* in floriculture crops. *Arthropod-Plant Interactions*, 8, 49-56.
- Bale, S., van Lenteren, J., Joop, F. et Bigler, F. (2008). Biological control and sustainable food production. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 363, 761-776.
- Barkalov, A.V. (2010). New Data on the Nomenclature and Fauna of the Genus *Sphaerophoria* Le Peletier et Serville, 1828 (Diptera, Syrphidae) from Siberia and Adjacent Territories. *Entomological Review*, 91(7), 898-907.
- Barriault, S., Soares, A., Gaimari, S. et Lucas, E. (2018a). *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae), a new aphidophagous biocontrol agent; development, survival and comparison with *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera: Cecidomyiidae). *Bulletin of Entomological Research*, 1-7.
- Barriault, S., Fournier, M., Soares, A.O. et Lucas, E. (2018b). *Leucopis glyphinivora*, a potential aphidophagous biocontrol agent? Predation and comparison with the commercial agent *Aphidoletes aphidimyza*. *BioControl*, 21-1.
- Baribeau, S. M., Parker, B. J. et Gerardo, N. M. (2014). Exposure to natural pathogens reveals costly aphid response to fungi but not bacteria. *Ecology and evolution*, 4(4), 488-93.
- Bass, C. et Jones, C.M. (2018). Editorial overview: Pests and resistance: Resistance to pesticides in arthropod crop pests and disease vectors: mechanisms, models and tools. *Opinion dans Insect Science*, 27, 4-6, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.04.009>
- Bellefeuille, Y., Fournier, M. et Lucas, E. (2017). *Eupeodes americanus* and *Leucopis annulipes* as potential biocontrol agents of the foxglove aphid at low temperatures. *IOBC-WPRS Bulletin*, 124, 62-66.
- Beltrà, A., Wäckers, F.L., Nedvěd, O. et Pekas, A. (2018). Predation rate and performance of three ladybirds against the green peach aphid *Myzus persicae* in sweet pepper. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(6), 491-499, doi: <https://doi.org/10.1111/eea.12691>

- Bennison, J. A. (1992). Biological control of aphids on cucumbers: use of open rearing systems or “banker plants” to aid establishment of *Aphidius matricareae* and *Aphidoletes aphidimyza*. Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent., 57, 457-466.
- Beschovski, V.L. et Merz, B. (1998). Contribution to the knowledge of the Chamaemyiidae (Diptera), with particular reference to the fauna of Switzerland. *Journal of the Swiss Entomological Society*, 71, 83-106.
- Biobest Canada Ltd. Robust aphid control with predatory Sphaerophoria-System (2017) Biobest Group NV. Récupéré le 21 juillet 2017 de <http://www.biobestgroup.com/en/news/robust-aphid-control-with-predatory-sphaerophoria-system>.
- Blackman, R.L. et Eastop, V.F. (2000). Aphids on the world’s crops: an identification and information guide. Second Edition. Wiley, New York.
- Bribosia, E., Bylemans, D., Huysmans, S., Schweitzer, P., M., Migon et van Impe, G., (2005). The use of common elder *Sambucus nigra* to promote Aphidophagous syrphids in apple orchards. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 70(4), 527-538.
- Brodsky, A.K. (1994). *The evolution of insect flight*. Oxford University Press, Oxford, England.
- Bugg, R.L., Colfer, R.G., Chaney, W.E., Smith, H.A. et Cannon, J. (2008). Flower flies (Syrphidae) and Other Biological Control Agents for Aphids in Vegetable Crops. *University of California Division of Agriculture and Natural Resources*. Publication 8285, 1-25.
- Canale A., Canovai R., Raspi A. (2002). *Leucopis glyphinivora* Tanasijtshuk (Diptera: Chamaemyiidae): allevamento di laboratorio e prove preliminari dell’influenza di temperature costanti sulla durata dello sviluppo preimmaginale. Présenté au 19^e congrès national italien d’entomologie, Juin 2012, Catania, 10-15.
- Carrier, A. et Toulouse, K. (2014). Réseau d’avertissements phytosanitaires – *Bulletin d’information*, 12, Cultures en serres. Récupéré de : <https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/b12cs14.pdf>

- Chambers, R. (1986). Preliminary experiments on the potential of hoverflies (Dipt.: Syrphidae) for the control of aphids under glass. *Entomophaga*, 31(2), 197-204.
- Darwin, E. (1800). *Phytologia, or, The philosophy of agriculture and gardening : with the theory of draining morasses, and with an improved construction of the drill plough*. London : Imprimé pour J. Johnson par T. Bensley.
- De Conti, B.F., Bueno, V.H.P., Sampaio, M.V. et Van Lenteren, J.C. (2011). Development and survival of *Aulacorthum solani*, *Macrosiphum euphorbiae* and *Uroleucon ambrosiae* at six temperatures. *Bulletin of Insectology*, 64, 63-68.
- Denlinger, D.L. et Lee, R.E.Jr. (2010). Low Temperature Biology of Insects. Cambridge University Press, Cambridge, 1-406.
- Detrain, C., Fichaux, M. et Verheggen, F. (2017). Tuned protection of aphids by ants against a predatory hoverfly. The Royal Entomological Society, *Ecological Entomology*, 1-10.
- Dixon, A.F.G., Jarošík, V., Honěk, A. (2005). Thermal requirements for development and resource partitioning in aphidophagous guilds. *European Journal of Entomology*, 102, 407-411.
- Dumont, F., Lucas, E. et Brodeur, J. (2015). Do furtive predators benefit from a selfish herd effect by living within their prey colony? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 69(6), 971-976.
- Eilenberg, J., Hajek, A. et Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387-400.
- Fischer, S. (1997). Contre le Puceron du cotonnier l'utilisation des plantes-relais. Des plantes-banques sous abris. Culture Légumière / Hors Série Environnement, 17-19.
- Fournier, M., Bellefeuille, Y. et Lucas, E. (2017). *Développement d'un système de plante-réservoir contre le puceron de la digitale à basse température*. Fiche Synthèse, Volet 4 – Appui au développement et au transfert de connaissances en agroenvironnement. Agriculture, Pêches et Alimentation Québec.

- Frank, S.D. (2009). Biological control of arthropod pests using banker plant systems : Past progress and future directions. *Biological Control*, 52, 8-16.
- Frazer, B.D. (1972). A simple and Efficient Method of Rearing Aphidophagous Hoverflies (Diptera: Syrphidae). *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 69, 23-24.
- Fréchette, B., Larouche, F. et Lucas, E. (2008). *Leucopis annulipes* larvae (Diptera: Chamaemyiidae) use a furtive predation strategy within aphid colonies. *European Journal of Entomology*, 105, 399-403.
- Gaimari, S.D. et Turner, W.J. (1996). Methods for Rearing Aphidophagous *Leucopis* spp. (Diptera: Chamaemyiidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 69(4), 363-369.
- Gillespie, M., Wratten, S., Sedcole, R. et Colfer R. (2011). Manipulating floral resources dispersion for hoverflies (Diptera : Syrphidae) in a California lettuce agro-ecosystem. *Biological Control*, 59, 215-220.
- Gillespie, D.R. et Acheampong, S. (2012). Dropping behaviour in *Aulacorthum solani* (Hemiptera : Aphididae) following attack by *Aphidius ervi* (Hymenoptera : Braconidae) : are sticky stem bands a useful integrated pest management method? *The Canadian Entomologist*, 144(4), 589-598.
- Giroux, I. (2015). Présence de pesticides dans l'eau au Québec : Portrait et tendances dans les zones de maïs et de soya – 2011 à 2014. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978- 2-550-73603-5.
- Gontijo, L.M., Beers, E.H., Snyder, W.E. (2013). Flowers promote aphid suppression in apple orchards, *Biological Control*, 66(1), 8-15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.03.007>.
- Grubin, S.M., Ross, D.W. et Wallin, K.F. (2011). Prey suitability and Phenology of *Leucopis* spp. (Diptera: Chamaemyiidae) Associated with Hemlock Woolly Adelgid (Hemiptera: Adelgidae) in the Pacific Northwest. *Environmental Entomology*, 40(6), 1410-1416.

- Hamilton, S.K., Doll, J.E. et Robertson, G.P. (2015). The ecology of agricultural ecosystems: long-term research on the path to sustainability. Oxford University Press, New York, p. 202, 378.
- Hart, A.J., Bale, J.S. et Fenlon, J.S. (1997). Developmental threshold, day-degree requirements and voltinism of the aphid predator *Episyphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *Annals of Applied Biology*, 130, 427-437.
- Helgadóttir, F., Toft, S. et Sigsgaard, L. (2017). Negative effects of low developmental temperatures on aphid predation by *Orius majusculus* (Heteroptera: Anthocoridae). *Biological Control*, 114, 59-64.
- Hindayana, D., Meyhöfer, R., Scholz, D. et Poehling, H-M. (2001). Intraguild Predation among the Hoverfly *Episyphus balteatus* de Geer (Diptera: Syrphidae) and Other Aphidophagous Predators. *Biological Control*, 20(3), 236-246.
- Hogg, B.N., Bugg, R. L. et Daane, K.M. (2011). Attractiveness of common insectary and harvestable floral resources to beneficial insects. *Biological Control*, 56, 76-84.
- Honěk, A. et Kocourek, F. (1988). Thermal requirements for development of aphidophagous Coccinellidae (Coleoptera), Chrysopidae, Hemerebiidae (Neuroptera), and Syrphidae (Diptera): some general trends. *Oecologia*, 76, 455-460.
- Hong, B.M. et Hung, H. Q. (2010). Effect of Temperature and Diet on the Life Cycle and Predatory Capacity of *Episyphus balteatus* (De Geer) (Syrphidae : Diptera) Cultured on *Aphis gossypii* (Glover). *Journal of International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences*, 16(2), 98-103.
- Hopper, J.V., Nelson, E.H., Daane, K.M. et Mills, N.J. (2011). Growth, development and consumption by four syrphid species associated with the lettuce aphid, *Nasonovia ribisnigri*, in California. *Biological Control*, 58, 271-276.
- Huang, N., Enkegaard, A., Osborne, L.S., Ramakers, P.M.J., Messelink, G.J., Pijnacker, J. et Murphy, G. (2011). The Banker Plant Method in Biological Control. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(3), 259-278.

- Huffaker, C.B. (2012). Theory and Practice of Biological Control. Academic Press. New York, New York.
- Jalali, M.A., Tirry, L. et De Clercq, P. (2010). Effect of temperature on the functional response of *Adalia bipunctata* to *Myzus persicae*. *BioControl*, 55, 261-269.
- Jandricic, S. E., Wraight, S.P., Bennett, K.C. et 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.
- Jandricic, S.E. (2013). Investigations of the biology of the pest aphid *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) (Hemiptera: Aphididae) and of biological control agents for control of multi-species aphid outbreaks in greenhouse floriculture crops (Dissertation Doctorale). Cornell University, 1-260.
- Jandricic, S.E., Mattson, N.S., Wraight, S.P. et Sanderson, J.P. (2014a). Within-Plant Distribution of *Aulacorthum solani* (Hemiptera: Aphididae), on Various Greenhouse Plants with Implications for Control. *Journal of Economic Entomology*, 107(2), 697-707.
- Jandricic, S.E., Dale, A.G., Bader, A. et Frank, S.D. (2014b). The effect of banker plant species on the fitness of *Aphidius colemani* Viereck and its aphid host (*Rhopalosiphum padi* L.). *Biological Control*, 76, 28-35.
- Juillet, J.A. (1964). Influence of weather on flight activity of parasitic Hymenoptera. *Canadian Journal of Zoology*, 42, 1133–1141.
- Kahanpää, J. (2014). Checklist of the fly families Chamaemyiidae and Lauxaniidae of Finland (Insecta, Diptera). *Zookeys*, 441, 277-283.
- Kaiser, M.E., Noma, T., Brewer, M.J., Pike, K.S., Vockeroth, J.R. et Gaimari, S.D., (2007). Hymenopteran Parasitoids and Dipteran Predators Found Using Soybean Aphid After Its Midwestern United States Invasion. *Annals of the Entomological Society of America*, 100(2), 196-205.

- Katsarou, I., Margaritopoulos, J.T., Tsitsipis, J.A., Perdikis, D.Ch. et Zarpas, K.D. (2005). Effect of temperature on development, growth, and feeding of *Coccinella septempunctata* and *Hippodamia convergens* reared on the tobacco aphid, *Myzus persicae nicotianae*. *BioControl*, 50, 565-588.
- Koppert B.V. (2011). The Netherlands. Following proper release strategy of Syrphidend essential. Récupéré le 21 juillet 2017 de <https://www.koppert.com/news-biological-systems/following-proper-release-strategy-of-syrphidend-essential/>
- Krsteska, V. (2015). Chamaemyiidae (Diptera) - predators of aphids on tobacco. *Tobacco Bulletin*, 65(1), 30-38.
- Landis, D.A., Wratten, S.D. et Gurr, G.M. (2000). Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45, 175-201.
- Langer, A., Boivin, G. et Hance, T. (2004). Oviposition, flight and walking capacity at low temperatures of four aphid parasitoid species (Hymenoptera: Aphidiinae). *European Journal of Entomology*, 101, 473-479.
- Lee, S.G., Kim, H.H., Kim, T.H., Park, G-J., Kim, K.H. et Kim, J.S. (2008). Development model of the foxglove aphid, *Aulacorthum solani* (Kaltenbach) on lettuce. *Korean Journal of Applied Entomology*, 47, 359-364.
- Lenteren, J.C. (2011). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57, 1-20.
- Leroy, P.D., Verheggen, F.J., Capella, Q., Francis, F. et Haubruge, E. (2010). An introduction device for the aphidophagous hoverfly *Episyrrhus balteatus* (De Geer) (Diptera: Syrphidae). *Biological Control*, 54, 181-188.
- Logan, J.D., Wolesensky, W. et Joern, A. (2006). Temperature-dependent phenology and predation in arthropod systems. *Ecological Modeling*, 196(3-4), 471-482.
- Louden, F. N et MacRae, R. J. (2010). Federal regulation of local and sustainable food claims in Canada: a case study of Local Food Plus. *Agriculture and Human Values*, 27(2), 177-188.

- Lucas, E. et Brodeur, J. (2001). A Fox in Sheep's Clothing: Furtive Predators Benefit from the Communal Defense of Their Prey. *Ecology*, 82(11), 3246-3250.
- Lucas, E. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. European *Journal of Entomology*, 102(3), 351-364, doi: 10.14411/eje.2005.05210.14411/eje.2005.052
- Maisonhaute, J.-E., Peres-Neto, P. et Lucas, E. (2010). Influence of agronomic practices, local environment and landscape structure on predatory beetle assemblage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4), 500-507.
- Maisonhaute, J-E. et Lucas, É. (2011). Influence of landscape structure on the functional groups of an aphidophagous guild : Active-searching predators, furtive predators and parasitoids. *European Journal of Environmental Sciences*, 1(1), 41-50.
- Manrique, L.A. (1993). Greenhouse crops: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 16(12), 2411-2477.
- Messelink, G. J., Bennison, J., Alomar, O., Ingegno, B. L., Tavella, L., Shipp, L., Palevsky, E. et Wäckers, F. L. (2014). Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl*, 9(4), 377-393.
- Meyling, N., Enkegaard, A. et Brodsgaard, H. (2003). Two Anthocoris bugs as predators of glasshouse aphids: voracity and prey preference. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 108, 59-70.
- McGregor, R.R., Gillespie, D.R., Quiring, D.M.J. et Foisy, M.R.J. (1999). Potential Use of *Dicyphus hesperus* Knight (Heteroptera: Miridae) for Biological Control of Pests of Greenhouse Tomatoes. *Biological Control*, 16(1), 104-110.
- McGregor, R.R et Gillespie, D.R. (2004). Olfactory responses of the omnivorous generalist predator *Dicyphus hesperus* to plant and prey odours. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 112(3), 201-205.
- McLean, I.F.G. (1992). Behaviour of Larval and Adult *Leucopis* (Diptera: Chamaemyiidae). *British Journal of Entomology and Natural History*, 5, 35-36.

- Messelink, G.J., Bloemhard, C.M.J., Hoogerbrugge, H., van Schelt, J., Ingegno, B.L. et Tavella, L. (2015). Evaluation of mirid predatory bugs and release strategy for aphid control in sweet pepper. *Journal of Applied Entomology*, 139, 333-341.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2017). Plan d'action de développement durable 2015-2020.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2014). Guide to Greenhouse Floriculture Production, publication 370, Toronto, Canada.
- Morris, R.K.A. (1998). *Hoverflies of Surrey*. Woking : Surrey Wildlife Trust.
- Murphy, G., Ferguson, G. et Shipp, L. (2006). *Les pucerons en serriculture*. Récupéré de : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/06-082.htm>
- Naranjo, S.E., Ellsworth, P.C. et Frisvold, G.B. (2015). Economic Value of Biological Control in Integrated Pest Management of Managed Plant Systems. *Annual Review of Entomology*, 60, 621-645.
- Obrycki, J.J. et Tauber, M.J. (1982). Thermal requirements for development of *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 75(6), 678-683.
- Ohta, I. et Honda, K. (2010). Use of *Sitobion akebiae* (Hemiptera : Aphididae) as an alternative host aphid for a banker-plant system using an indigenous parasitoid, *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera : Braconidae). *Applied Entomology and Zoology*, 45(2), 233-238.
- Ouattara, T.Y. (2018, novembre). Développement et taux de survie du Syrphe d'Amérique *Eupeodes americanus* Wiedemann (Diptera: Syrphidae), prédateur aphidiphage et comparaison avec la Cécidomyie du puceron *Aphidoletes aphidimyza* Rondani (Diptera: Cecidomyiidae). Communication présentée à la 145^e réunion 2018 de la Société d'entomologie du Québec, Québec, Québec.

- Parolin, P., Bresch, C., Bout, A., Ruiz, G., Poncet, C. et Desneux, N. (2012). Testing Banker Plants for Predator Installation. Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation, 211-218.
- Parolin, P., Bresch, C., Poncet, C. et Desneux, N. (2014). Introducing the term 'Biological Plants' for integrated pest management. *Scientia Agricola*, 71(1), 77-80.
- Payton Miller, T.L. et Rebek, E.J. (2018). Banker Plants for Aphid Biological Control in Greenhouses, *Journal of Integrated Pest Management*, 9(1), doi: <https://doi.org/10.1093/jipm/pmy002>
- Pineda, A. et Marcos-García, M.A. (2008a). Evaluation of several strategies to increase the residence time of *Episyrphus balteatus* (Diptera, Syrphidae) releases in sweet pepper greenhouses. *Annals of Applied Biology*, 152(3), 271-276.
- Pineda, A. et Marcos-García, M.A. (2008b). Introducing barley as aphid reservoir in sweet-pepper greenhouses: Effects on native and released hoverflies (Diptera: Syrphidae). *European Journal of Entomology*, 105, 531-535.
- Pu, D.-q., Liu, H.-l., Gong, Y.-y., Ji, P.-c., Li, Y.-j., Mou, F.-s. et Wei, S.-j. (2017). Mitochondrial genomes of the hoverflies *Episyrphus balteatus* and *Eupeodes corollae* (Diptera: Syrphidae), with a phylogenetic analysis of Muscomorpha. *Scientific Reports*, 7, doi: <https://doi.org/10.1038/srep44300>
- Putra, N.S. et Yasuda, H. (2006). Effects of prey species and its density on larval performance of two species of hoverfly larvae, *Episyrphus balteatus* de Geer and *Eupeodes corolla* Fabricius (Diptera: Syrphidae). *Applied Entomology and Zoology*, 41(3), 389-397.
- Radcliffe, E.B. (1982). Insect Pests of Potato. *Annual Review of Entomology*, 27, 173-204, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.27.010182.001133>
- Ratchke, B., Hamrum, C.L. et Glass, A.W. (1967). Observations on the Interrelationships among Ants, Aphids, and Aphid Predators. *The Great Lakes Entomologist*, 1(5), 169-173.

- Rebek, E.J., Sadof, C.S. et Hanks, L.M. (2005). Manipulating the abundance of natural enemies in ornamental landscapes with floral resource plants, *Biological Control*, 33(2), 203-216, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.02.011>.
- Régnière, J., Powell, J., Bentz, B. et Nealis, V. (2012). Effects of temperature on development, survival and reproduction of insects: Experimental design, data analysis and modeling. *Journal of Insect Physiology*, 58(5), 634-647.
- Richard, C. et Boivin, G. (1994). Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada : un traité pratique illustré «Cet ouvrage a paru en anglais sous le titre Diseases and pests of vegetable crops in Canada, publié sous la direction de Ronald J. Howard, J. Allan Garland et W. Lloyd Seaman.». La société Canadienne de Phytopathologie et la Société d'entomologie du Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- Rocca, M. et Messelink, G.J. (2017). Combining lacewings and parasitoids for biological control of foxglove aphids in sweet pepper. *Journal of Applied Entomology*, 141(5), 402-410.
- Rojo, S., Gilbert, F., Marcos-García, M.A., Nieto, J.M. et Mier Durante, M.P. (2003). A world review of predatory hoverflies (Diptera, Syrphidae: Syrphinae) and their prey. Alicante, Spain: Centro Iberoamericano de la Biodiversidad (CIBIO) Ediciones, Universidad de Alicante.
- Rotheray, G.E. et Gilbert, F. (2011) The natural history of Hoverflies. Forrest Text.
- Sanchez, J.A., Canovas, F. et Lacasa, A. (2007). Thresholds and Management Strategies for *Aulacorthum solani* (Hemiptera: Aphididae) in Greenhouse Pepper. *Journal of Economic Entomology*, 100(1), 123-130.
- SAS Institute Inc (2009). JMP® 8 User Guide, Second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Satar, S., Raspi, A., Özdemir, I., Tusun, A., Karacaoğlu, M. et Benelli, G. (2015). Seasonal habits of predation and prey range in aphidophagous silver flies (Diptera Chamaemyiidae), an overlooked family of biological control agents. *Bulletin of Insectology*, 68(2), 173-180.

- Schneider, F. (1969). Bionomics and Physiology of Aphidophagous Syrphidae. *Annual Review of Entomology*, 14, 103-124.
- Schüder, I., Hommes, M. et Larink, O. (2004). The influence of temperature and food supply on the development of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 101, 379-384.
- Sentis, A., Lucas, E. et Vickery, W.L. (2008). *Modélisation et validation empirique de la ponte optimale chez le prédateur furtif Aphidoletes aphidimyza Rondani (Diptera : Cecidomyiidae); influence des densités de proies, de fourmis et de prédateurs intraguildes* (Mémoire de maîtrise non publié). Université du Québec à Montréal.
- Sentis, A., Hemptinne, J.-L. et Brodeur, J. (2012). Using functional response modeling to investigate the effect of temperature on predator feeding rate and energetic efficiency. *Oecologia*, 169(4), 1117-1125.
- Shipp, J.L. et Wang, K. (2006). Evaluation of *Dicyphus hesperus* (Heteroptera: Miridae) for Biological Control of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) on Greenhouse Tomato. *Journal of Economic Entomology*, 99(2), 414-420.
- Silva, D.B., Bueno, V.H.P., Sampaio, M.V. et van Lenteren, J.C. (2015). Performance of the parasitoid *Praon volucre* in *Aulacorthum solani* at five temperatures. *Bulletin of Insectology*, 68(1), 119-125.
- Sluss, T.P. et Foote, B.A. (1973). Biology and Immature Stages of *Leucopis pinicola* and *Chamaemyia polystigma* (Diptera: Chamaemyiidae). *The Canadian Entomologist*, 105, 1443-1452.
- Slogett, J.J. (2005). Are we studying too few taxa? Insights from aphidophagous ladybird beetles (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 102(3), p.391.
- Soleyman-Nezhadiyan et E., Laughlin, R. (1998). Voracity of larvae, rate of development in eggs, larvae and pupae, and flight seasons of adults of the hoverflies *Melangyna viridiceps* Macquart and *Symosyrphus grandicornis*

- Macquart (Diptera: Syrphidae). *Australian Journal of Entomology*, 37(37), 243-248.
- Sørensen, C. H., Toft, S. et Kristensen, T.N. (2013). Cold-acclimation increases the predatory efficiency of the aphidophagous coccinellid *Adalia bipunctata*. *Biological Control*, 65(1), 87-94.
- Statistics Canada (2016). Greenhouse, sod and nursery industries, 2015. Component of Statistics Canada catalogue, no. 11-001-X, 1-3.
- Starý, P. (1970). Biology of aphid parasites (Hymenoptera: Aphidiidae) with respect to integrated control. *Series Entomologica*, 6, 1-643.
- Sundby, R.A. (1966). A comparative study of the efficiency of three predatory insects *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera, Coccinellidae), *Chrysopa carnea* Steph. (Neuroptera, Chrysopidae) and *Syrphus ribesii* L. (Diptera, Syrphidae) at two temperatures. *Entomophaga*, 11(4), 395-404.
- Sutherland, J.P., Sullivan, M.S. et Poppy, G.M. (2001). Oviposition behaviour and host colony size discrimination in *Episyphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *Bulletin of Entomological Research*, 91(5), 411-417.
- Takada, H., Ono, T., Torikura, H. et Enokiya, T. (2006). Geographic variation in esterase allozymes of *Aulacorthum solani* (Homoptera: Aphididae) in Japan, in relation to its outbreaks on soybean. *Applied Entomology and Zoology*, 41, 595-605.
- Tamaki, G., Landis, B.J. et Weeks, R.E. (1967). Autumn populations of green peach aphid on peach trees and the role of syrphid flies in their control. *Journal of Economic Entomology*, 60, 433-336.
- Tauber, M.J., Tauber, C.A., Daane, K.M. et Hagen, K.S. (2000). Commercialization of Predators: Recent Lessons from Green Lacewings (Neuroptera: Chrysopidae: Chrysoperla). *American Entomologist*, 46(1), 26-38.
- Teets, N.M. et Denlinger, D.L. (2013). Physiological mechanisms of seasonal and rapid cold-hardening in insects. *Physiological Entomology*, 38(2), 105-116.

Tenhuberg, B. (1995). Estimating Predatory Efficiency of *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae) in Cereal Fields. *Environmental Entomology*, 24(3), 687-691.

Tenhuberg, B. et Poehling, H.-M. (1995). Syrphids as natural enemies in Germany : aspects of their biology and efficacy in different years and regions. AGEE, 52, 39-43.

University of Minnesota Center for Urban and Regional Affairs and Center for Sustainable Building Research (2013). Cold Climate Greenhouse Resource: A guidebook for designing and building a cold-climate greenhouse. The Regents of the University of Minnesota, 1-65.

Van Alfen, N.K. (2014). *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. University of California, San Diego: Academic Press. Récupéré de:
<https://books.google.ca/>

Van Driesche, R. G., Lyon, S., Sanderson, J. P., Bennett, K. C., Stanek III, E. J. et Zhang, R. (2008). Greenhouse trials of *Aphidius colemani* (Hymenoptera: Braconidae) Banker Plants for Control of Aphids (Hemiptera: Aphididae) in Greenhouse Spring Floral Crops. *Florida Entomologist*, 91(4), 583-591.

Van Driesche, R.G., Carruthers, R.I. , Center, T., Hoddle, M.S., Hough-Goldstein, J., Morin, L. Smith, L., Wagner, D.L., Blossey, B., Brancatini, V., Casagrande, R., Causton, C.E., Coetzee, J.A., Cuda, J., Ding, J., Fowler, S.V., Frank, J.H., Fuester, R., Goolsby, J., Grodowitz, M., Heard, T.A., Hill, M.P., Hoffmann, J.H., Huber, J., Julien, M., Kairo, M.T.K., Kenis, M., Mason, P., Medal, J., Messing, R., Miller, R., Moore, A., Neuenschwander, P., Newman, R., Norambuena, H., Palmer, W.A., Pemberton, R., Perez Panduro, A., Pratt, P.D., Rayamajhi, M., Salom, S., Sands, D., Schooler, S., Schwarzländer, M., Sheppard, A., Shaw, R., Tipping, P.W. et van Klinken, R.D. (2010). Classical biological control for the protection of natural ecosystems, *Biological Control*, 54(1),2-33.

van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57(1), 1-20.

Varga, K. E. (2017). Defeating foxglove aphids – When it comes to successful use of biocontrol agents to control aphids in ornamental crops, changing the approach may be key. *Greenhouse Management*, 1-2.

Vockeroth, J.R. (1992). The flower flies of the subfamily Syrphinae of Canada, Alaska, and Greenland. Agriculture Canada, Ottawa.

Wilson, L.T. et Barnett, W.W. (1983). Degree-Days: an aid in crop and pest management. *California Agriculture*, 37(1), 4-7.

Yovkova, M., Petrović-Obradović, O., Tasheva-Terzieva, E. et Pencheva, A. (2013). Aphids (Hemiptera, Aphididae) on ornamental plants in greenhouses in Bulgaria. *Zookeys*, 319, 347-361.