

Université de Montréal

Évaluation du potentiel des parasitoïdes *Binodoxys communis*, *Aphidius colemani* et  
*Aphelinus certus* pour la lutte biologique au puceron du soya

Par  
Véronique Gariépy

Département de sciences biologiques  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
En vue de l'obtention du grade de maître ès (M.Sc.)  
En sciences biologiques

Août, 2011

© Véronique Gariépy, 2011

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :  
Évaluation du potentiel des parasitoïdes *Binodoxys communis*, *Aphidius colemani* et  
*Aphelinus certus* pour la lutte biologique au puceron du soya

Présenté par :  
Véronique Gariépy

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :  
Antonella Cattaneo (présidente-rapporteur)  
Jacques Brodeur (directeur)  
Guy Boivin (co-directeur)  
Geneviève Labrie (membre du jury)

## Résumé

Le puceron du soya (*Aphis glycines*) est le ravageur le plus important de la culture du soya en Amérique du Nord. Quoiqu'efficaces, les pesticides permettent le contrôle des ravageurs que pour une courte période et nécessitent plusieurs applications au cours de la saison. De plus, ils sont dommageables pour l'environnement et la santé humaine. La lutte biologique se présente comme une alternative crédible pour le contrôle des populations d'*A. glycines* en Amérique du Nord. Trois parasitoïdes (*Binodoxys communis*, *Aphidius colemani*, *Aphelinus certus*) du puceron semblent être des candidats prometteurs.

L'objectif de cette étude était d'examiner certains attributs biologiques de ces parasitoïdes au Québec. Dans le cas de *B. communis* et *A. certus* nous avons estimé leur synchronisme saisonnier ainsi que leur résistance au froid en laboratoire et en conditions naturelles. Dans le cas, d'*A. colemani*, nous avons évalué sa capacité à parasiter le puceron du soya et à se disperser dans un champ de soya.

Nos résultats démontrent que la souche utilisée de *B. communis* a perdu sa capacité à entrer en diapause, probablement à cause de la longue période d'élevage en laboratoire qui a suivi son échantillonnage en Asie. *Aphelinus certus* démontre un potentiel intéressant puisqu'il possède un synchronisme saisonnier tant en automne qu'au printemps avec son hôte ainsi qu'un bon potentiel de survie hivernale au Québec. Quant à *A. colemani*, les essais suggèrent qu'il se disperse rapidement hors des champs sans attaquer de manière significative *A. glycines*.

**Mots clés :** pucerons du soya, *Aphis glycines*, parasitoïde, *Aphelinus certus*, *Aphidius colemani*, *Binodoxys communis*, lutte biologique, survie hivernale, synchronisme saisonnier, dispersion

## Abstract

The soybean aphid (*Aphis glycines*) has become the most important pest of soybean in North America. Despite their efficiency, insecticides do eliminate the pest only for short periods and several applications may be required during the growing season. Furthermore, they are detrimental for the environment and human health. Biological control appears as a promising alternative for the control of *A. glycines* populations in North America. Three parasitoid species (*Binodoxys communis*, *Aphidius colemani*, *Aphelinus certus*) have been identified as potential candidates.

The objective of this study was to study some biological attributes of these parasitoids in Québec. For *B. communis* and *A. certus* we examined their seasonal activities and their cold hardiness in laboratory and natural conditions. For *A. colemani*, we evaluated its capacity to parasitize the soybean aphid and to disperse in soybean fields.

Our results revealed that the *B. communis* strain we used had lost its capacity to enter diapause, probably due to the long period of laboratory rearing following its sampling in Asia. *Aphelinus certus* showed an interesting potential because the species is synchronized with its host both in the fall and the spring and has the capacity to overwinter in Québec. For *A. colemani*, the essays suggest that it disperses rapidly out of the field without attacking significantly *A. glycines*.

**Keywords :** soybean aphid, *Aphis glycines*, parasitoid, *Aphelinus certus*, *Aphidius colemani*, *Binodoxys communis*, biological control, overwinter survival, seasonal synchronism, dispersion

## Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des abréviations et sigles.....	x
Remerciements.....	xii
Avant-propos.....	xiii
<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1. Revue de littérature .....</b>	<b>11</b>
1.1 Problématique.....	12
1.1.1 Le puceron du soya ( <i>Aphis glycines</i> ).....	12
1.1.2 Les dommages.....	15
1.1.3 Insecticides.....	15
1.2 Ennemis naturels.....	17
1.2.1 Prédateurs.....	17
1.2.2 Parasitoïdes.....	19
1.2.3 Entomopathogènes.....	20
1.3 Initiative américaine.....	21
1.3.1 Lutte biologique classique.....	22
1.4 Projet PSIA.....	23
1.4.1 Lutte biologique inoculative.....	24
1.4.2 Lutte biologique par aménagement.....	26
<b>Chapitre 2. Why two species of soybean aphid parasitoids showed promise in the laboratory but failed under field conditions .....</b>	<b>27</b>
2.1 Introduction.....	30

2.2 Material and methods .....	33
2.2.1 Diapause induction in <i>B. communis</i> .....	33
2.2.2 Field parasitism and dispersal of <i>A. colemani</i> .....	34
2.3 Results .....	38
2.3.1 Diapause induction in <i>B. communis</i> .....	38
2.3.2 Field parasitism and dispersal of <i>A. colemani</i> .....	40
2.4 Discussion .....	46
2.5 Acknowledgments .....	51
<b>Chapitre 3. Écologie saisonnière d'<i>Aphelinus certus</i></b> <b>(Hymenoptera: Aphelinidae), parasitoïde du</b> <b>puceron du soya, <i>Aphis Glycines</i> (Hemiptera:</b> <b>Aphididae) .....</b>	<b>52</b>
3.1 Introduction .....	55
3.2 Matériels et méthodes.....	58
3.2.1 Induction de la diapause .....	58
3.2.2 Survie hivernale et émergence printanière .....	60
3.2.3 Point de cristallisation .....	62
3.3 Résultats et discussion.....	64
3.3.1 Induction de la diapause .....	64
3.3.2 Survie hivernale et émergence printanière.....	66
3.3.3 Point de cristallisation .....	73
3.4 Remerciements .....	77
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>83</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I :</b> Le recensement du soya cultivé au Canada et par province du Canada de 1976 à 2006 et 2011.....	5
<b>Tableau II :</b> Hôtes primaires et secondaires répertoriés du puceron du soya en Asie et en Amérique du Nord .....	13
<b>Table III:</b> The incidence of emergence within the mummy and prepupal diapause measured in the parasitoid <i>Binodoxys</i> <i>communis</i> , when reared under different temperature and photoperiodic conditions .....	40
<b>Table IV:</b> Number of mummies for <i>A. colemani</i> and <i>A. certus</i> observed on sentinel plants in each essay .....	41
<b>Table V:</b> Predator identity and abundance observed on the sentinel plants during three essays on <i>A. colemani</i> dispersal in a soybean field .....	43
<b>Tableau VI :</b> Pourcentage de momies disséquées ayant un individu d' <i>A certus</i> au stade prépupe, pupes ou adulte au printemps 2011 selon la région et le traitement subi .....	70

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Le cycle sexué et asexué du puceron du soya .....	12
<b>Figure 2.1</b> : Experimental grid of soybean plants infested by <i>Aphis glycines</i> (sentinel plants) used for determining parasitism and dispersal of <i>Aphidius colemani</i> .....	36
<b>Figure 2.2</b> : Minimum, maximum and average temperature and photoperiod for Montréal during August and September 2009 at the Aéroport International Pierre Elliott Trudeau .....	38
<b>Figure 2.3</b> : Minimum and maximum average temperature for the areas of Minneapolis (USA; 1961-1990), Harbin (China; dates not available) and Montréal (Canada; 1971-2000) .....	39
<b>Figure 2.4</b> : Spatial distribution of soybean sentinel plants (black dot) from which <i>A. glycines</i> mummies containing <i>A. colemani</i> were observed following tests conducted on 5, 15 and 21 July 2010 in a soybean field .....	42
<b>Figure 2.5</b> : Mean air relative humidity recorded at CÉROM and average wind speed recorded at the Aéroport de Saint-Hubert during the three essays.....	44
<b>Figure 2.6</b> : Average temperature and cumulative precipitation recorded at CÉROM during the three essays .....	45



**Figure 3.1 :**

(a) Le pourcentage moyen de pré-pupes d' <i>Aphelinus certus</i> en diapause en fonction de la date d'exposition aux conditions naturelles à l'Insectarium de Montréal à l'automne 2010 .....	65
(b) Le nombre d'heures de lumière du 01 septembre au 19 octobre 2010 .....	65
(c) Les températures minimums, moyennes, maximums enregistrées à l'Aéroport International Pierre Elliott Trudeau du 01 septembre au 19 octobre 2010 .....	65
<b>Figure 3.2 :</b> Taux de survie d' <i>Aphelinus certus</i> ayant subi le traitement sous couvert de neige ou à l'air libre à l'hiver 2011 dans les régions de Québec, Laval et Saint-Blaise-sur-Richelieu .....	69
<b>Figure 3.3 :</b> La couverture de neige au sol enregistrée au cours du mois de décembre 2010 et de janvier à avril 2011 à trois stations situées à proximité des régions choisies pour l'emplacement des momies durant la période hivernale .....	69
<b>Figure 3.4 :</b> Émergence cumulative au printemps 2011 des mâles (n=103) et femelles (n=222) <i>Aphelinus certus</i> ayant passé l'hiver en conditions naturelles .....	71

## Liste des abréviations et sigles

°C	Degrés Celsius / Degree Celsius
cm	Centimètre / Centimeter
d	Jours / Days
h	Heure / Hour
ha	Hectare    jj/mm
km	Kilomètre / Kilometer
L: D	Light : Dark
L : N	Lumière : Noirceur
m	Mètre / Meter
mg	Milligramme / Milligram
RH	Humidité relative / Relative humidity

*«La science doit s'accommoder à la nature. La nature ne peut s'accommoder à la science. »*

-Ferdinand Brunot

## **Remerciements**

Cette étude a été réalisée grâce au financement du Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), via le programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire (PSIA).

Je tiens à remercier sincèrement Jacques Brodeur, mon directeur de recherche, et Guy Boivin, mon codirecteur de recherche pour le support technique et pédagogique lors de la réalisation des expérimentations ainsi que de l'analyse et l'interprétation des résultats.

Je tiens également à remercier les professionnels de recherche, les étudiants d'été et les stagiaires qui ont contribué à l'avancement de ce projet de recherche. Un merci tout particulier à Josée Doyon, Geneviève Labrie et le CÉROM. Merci à Émilie Gousse-Matte, Léna Durocher-Granger, Alexis Rutschmann, Dominique Boursier-Lépine et Amélie Ezanic.

Finalement, je remercie ma famille, mes amis (es) et mes collègues du laboratoire pour leur soutien et encouragement au cours de ce projet.

## **Avant-propos**

Depuis quelques années un ravageur non-indigène, le puceron du soya (*Aphis glycines* Matsumura, Hemiptera: Aphididae) provoque des pertes économiques importantes dans la culture du soya en Amérique du Nord. Les traitements chimiques sont très efficaces, mais les résultats ne perdurent qu'à court terme durant la saison. De plus, l'utilisation trop fréquente de pesticides risque d'induire des résistances chez ce ravageur. De ce fait, divers projets dans le but de trouver des alternatives aux pesticides furent initiés tant aux États-Unis qu'au Canada. Dans ce contexte, la lutte biologique est envisagée afin de contrôler les densités de population du puceron du soya. Parmi les espèces candidates, trois parasitoïdes ont retenu notre attention au Québec. Afin de mieux évaluer leur véritable potentiel dans nos régions des essais en laboratoire ainsi qu'en champ ont été menés avec ces espèces: *Binodoxys communis*, *Aphidius colemani* et *Aphelinus certus*. Le soya étant une culture de grande importance en Amérique du Nord, l'obtention de résultats était des plus pertinents.

Ce présent mémoire est en partie rédigé sous forme d'articles scientifiques (chapitres 2 et 3) dans le but de permettre une diffusion rapide des résultats à la communauté scientifique. Une introduction générale, une revue de littérature (chapitre 1) ainsi qu'une conclusion générale sont également incluses.

## Introduction générale

Les invasions biologiques sont de plus en plus fréquentes à la suite de l'augmentation des échanges internationaux et à certains changements de l'environnement qui amènent des espèces à coloniser des régions qui leur étaient inaccessibles ou hostiles par le passé (Sakai *et al.* 2001). L'absence d'ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes, pathogènes) est l'un des principaux facteurs qui facilitent l'établissement des espèces envahissantes (Messing et Wright 2006). Certaines de ces espèces deviennent alors incontrôlables et affectent la dynamique (biodiversité, fonctionnement) des écosystèmes naturels ou aménagés par l'homme. Aux États-Unis seulement, les coûts liés à ces invasions peuvent s'élever à des milliards de dollars annuellement (Pimentel *et al.* 2000). Certaines espèces peuvent même se voir attribuer le statut de ravageur, une qualification donnée aux espèces considérées comme nuisibles par l'homme, principalement dans les milieux agricoles et forestiers.

Afin de contrer les espèces envahissantes l'homme développe des approches de prévention afin de prévenir leur venue et leur établissement. Toutefois ceci n'est pas toujours suffisant et le contrôle des densités de population de ces organismes devient essentiel. Certaines approches sont efficaces tout en évitant d'augmenter la dégradation du milieu. La lutte biologique représente une alternative des plus appropriées et communes. Elle consiste à utiliser des organismes vivants ou des dérivés d'organismes vivants, tels des toxines, pour le contrôle des espèces

envahissantes ainsi que des ravageurs (Vincent *et al.* 2007). Divers types de lutte biologique peuvent être développés, selon les problématiques, les besoins et les options disponibles.

La lutte biologique inondative consiste à augmenter le nombre d'ennemis naturels dans un environnement donné en effectuant des lâchers importants lorsque la densité de population d'un ravageur croît dangereusement (Debach et Rosen 1991). Par exemple, *Trichogrammatoidea cryptophlebiae* Nagaraja (Hymenoptera : Trichogrammatidae), une guêpe parasitoïde d'œufs de Lépidoptère fût relâchée pour le contrôle de *Cryptophlebia leucotreta* Meyrick (Lepidoptera : Tortricidae) dans des plantations de citrons en Afrique du Sud. Un nombre de 80 000 parasitoïdes par hectare par semaine a été relâché durant deux saisons de récolte. Le nombre total estimé de parasitoïdes relâchés est respectivement de 2,3 et 3,8 millions pour la première et deuxième saison de lutte biologique. Ces relâchées de *T. cryptophlebiae* ont permis de réduire les pertes de récolte de  $49,4 \pm 12,4\%$  et  $61,1 \pm 8,3 \%$  (Newton 1990).

La lutte biologique classique, consiste quant à elle à introduire dans un nouvel environnement un organisme originaire de la même région que l'espèce invasive. Cet organisme a co-évolué avec l'espèce invasive et présente donc, a priori, les capacités qui lui permettent de l'exploiter (Debach et Rosen 1991). Dans un programme de la lutte biologique classique, la naturalisation de l'ennemi naturel

introduit est souhaitée afin d'obtenir un contrôle à long terme du ravageur. Nous retrouvons l'exemple du cactus du genre *Opuntia* sp. (Caryophyllales : Cactaceae), importé en Australie comme plante ornementale originaire du continent américain. Cette plante devient extrêmement envahissante et obligea le gouvernement australien à prendre des mesures d'éradication. Ils tentèrent d'éliminer cet envahisseur en empoisonnant les plants à l'aide de divers herbicides, mais le cactus continua à se propager. Face à ces échecs un programme de lutte biologique fût initié et les chercheurs testèrent plusieurs insectes phytophages pour finalement introduire au cours des années 1920, *Cactoblastis cactorum* Berg. (Lepidoptera : Pyralidae) (Freeman 1992). Cet insecte phytophage originaire du continent américain permis non seulement d'arrêter la progression de cette plante, mais également de l'éradiquer dans certaines régions de l'Australie.

La lutte biologique par aménagement a pour objectif de favoriser la présence et d'augmenter le nombre et l'efficacité des espèces indigènes ou naturalisées ayant les capacités de réduire les populations de l'organisme indésirable. Dans ce contexte, les approches envisagées consistent en particulier à manipuler l'environnement pour le rendre plus favorable aux agents de lutte biologique, par exemple en introduisant des plantes nectarifères pour les parasitoïdes ou en aménageant des refuges pour les prédateurs (Debach et Rosen 1991). Ainsi, des plants de coriandre sont plantés en bordure de champs de patates afin d'offrir une source de nectar aux parasitoïdes indigènes (Gurr et Wratten 2000).



Finalement, la lutte biologique inoculative consiste à introduire des ennemis naturels dès la venue du ravageur afin d'effectuer un contrôle immédiat sur celui-ci (Debach et Rosen 1991). Par exemple, le prédateur généraliste *Anthocoris nemoralis* F. (Hemiptera : Anthocoridae) est relâché (2 600 à 7 200 adultes par hectare) en début de saison (fin mai à début juin) dans des vergers de *Pyrus communis* L. (Rosales : Rosaceae) pour le contrôle de *Cacopsylla pyri* L. (Hemiptera : Psyllidae) (Arcier *et al.* 2001).

Malgré des conditions climatiques très rigoureuses, dont des températures hivernales pouvant atteindre  $-40^{\circ}\text{C}$  (Environnement Canada 2010), le Québec constitue une région où la venue d'espèces envahissantes est fréquente. Le puceron du soya, *Aphis glycines* Matsumura (Hemiptera : Aphididae), fait partie des espèces envahissantes naturalisées au Québec depuis quelques années. Il s'agit maintenant du ravageur le plus préoccupant dans la culture du soya (*Glycines max*) en Amérique du Nord. C'est une culture d'importance depuis la fin des années 1940 en Amérique du Nord, où la production de soya aux États-Unis surpassa celle de l'Asie (Hymowitz 1970, Berlan *et al.* 1976). Cette culture pris par la suite de l'importance au Canada, en 2011 la superficie de la culture de soya s'élevait à environ 1,5 million d'hectares, dans l'ensemble des provinces productrices (Statistique Canada). Au Québec, la superficie de cette culture a augmenté d'environ cinq fois entre 1991 et 2001 et a atteint 281 984 hectares en 2011, plaçant le Québec au second rang des provinces productrices de soya au Canada (Tableau I). Les recettes monétaires de cette culture au Canada (680 millions de dollars) se situent au cinquième rang derrière le canola,

le blé, la pomme de terre et le maïs. Durant cette même année, près de 40% (1,5 million de tonnes) de la production totale de soya du Canada fût exportée (Dorff 2007).

**Tableau I:** Le recensement du soya cultivé au Canada et par province du Canada de 1976 à 2006 et 2011.

Province	Hectares							
	2011*	2006**	2001**	1996**	1991**	1986**	1981**	1976**
Canada	1 572 325	1 202 098	1 082 547	876 901	598 454	387 156	282 914	153 793
Terre-Neuve et Labrador	x	0	0	0	0	0	0	0
Île-du-Prince-Édouard	22 258	4 580	2 813	2 255	2 378	1 911	42	0
Nouvelle-Écosse	3 035	958	772	502	185	306	78	17
Nouveau-Brinswick	4 452	762	328	566	18	59	21	4
Québec	281 984	178 161	148 070	96 693	25 271	4 395	1 439	240
Ontario	981 362	872 455	909 922	776 209	570 228	380 298	278 853	152 910
Manitoba	279 233	141 869	20 249	237	50	139	2 299	309
Saskatchewan	x	2 229	359	x	0	0	69	183
Alberta	x	1 083	36	429	323	x	110	127
Colombie-Britannique	x	0	0	x	2	x	2	4

Signes conventionnels:

x: confidentiel en vertu des dispositions de la loi sur la statistique

0: zéro absolu ou valeur arrondie à zéro

Références: Statistique Canada 2011\*, Dorff 2007\*\*

Certains arthropodes ravageurs et maladies du soya peuvent entraîner des pertes importantes de revenus en altérant tant la biomasse des grains et fèves de soya que la qualité de la culture, en modifiant leur teneur en huile et en protéine (Beckendorf *et al.* 2008). Parmi les arthropodes ravageurs de cette culture au Québec, on note le tétranyque à deux points, la mouche des semis, quelques espèces de chrysomèles, d'altises, de punaises, de thrips, de sciarides, de criquets, ainsi que des larves de quelques lépidoptères (noctuelles et pyrales) (Roy et Leclerc 2005). Ces arthropodes sont toutefois des ravageurs mineurs et sporadiques ne nécessitant que très rarement des traitements phytosanitaires (Hodgson *et al.* 2005). Toutefois,

depuis l'introduction accidentelle du puceron du soya en Amérique du Nord en 2000, une augmentation de l'utilisation des insecticides est observée (Heimpel et Shelly 2004). Au Québec les coûts défrayés par les agriculteurs pour l'utilisation des pesticides dans la culture du soya est passé de 2 765\$ en 2001 à 7 079\$ en 2002, une somme toujours d'actualité (La financière agricole 2011). L'augmentation fulgurante des coûts liés aux pulvérisations de pesticides coïncide avec l'arrivée du puceron du soya dans nos régions. Dans le but de trouver une alternative aux insecticides, certains spécialistes se sont interrogés sur la biologie de ce ravageur, les dommages qu'il occasionne ainsi que les mesures de contrôle à adopter (Hartman *et al.* 2001).

En Asie, la guildes d'ennemis naturels principalement composée de prédateurs et de parasitoïdes permet un contrôle significatif des populations du puceron du soya (Van Den Berg *et al.* 1997, Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007, Ragsdale *et al.* 2011). De même, en Amérique du Nord, des études démontrent que les ennemis naturels, essentiellement des prédateurs aphidiphages indigènes ou naturalisés, contribuent souvent au contrôle des populations du puceron du soya (voir Ragsdale *et al.* 2011). Toutefois, la contribution des prédateurs n'est pas toujours suffisante pour prévenir les explosions de populations du puceron du soya (Fox *et al.* 2005, Costamagna et Landis 2006). Plusieurs chercheurs envisagent alors l'introduction de parasitoïdes dans le cadre de programmes de lutte biologique classique afin d'avoir une action complémentaire à celle des prédateurs (Ragsdale *et al.* 2011). Les parasitoïdes se présentent comme de bons auxiliaires de par leur capacité à repérer de faibles

densités d'hôtes, leur spécificité parasitaire et leur synchronisme saisonnier avec leurs hôtes (Murdoch *et al.* 1985).

La lutte biologique classique se présente donc comme une possibilité intéressante pour le contrôle du puceron du soya en Amérique du Nord. Parmi les parasitoïdes identifiés au cours du projet (initié aux États-Unis et auquel participe le Canada) et à la suite des essais de spécificité et de performance réalisés en laboratoire (Desneux *et al.* 2009), le groupe de recherche américain a ciblé *Binodoxys communis* Gahan (Hymenoptera : Braconidae) comme un candidat à fort potentiel pour des lâchers en Amérique (Ragsdale *et al.* 2011). Toutefois, un supplément d'informations sur certains aspects de la biologie de cette guêpe parasitoïde est nécessaire, dont une meilleure compréhension de sa capacité à survivre aux conditions hivernales et de son synchronisme saisonnier avec l'hôte. Ces informations permettraient de conclure sur la capacité du parasitoïde à s'établir en Amérique du Nord et à avoir un impact durable dans la gestion du puceron du soya.

D'autres types de lutte biologique ont été envisagés, dont la lutte biologique inoculative avec *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Braconidae). Cette espèce a démontré en laboratoire sa capacité de parasiter le puceron du soya. La préférence de ce parasitoïde pour les pucerons du soya de grandes tailles aurait pour avantage de réduire le taux de croissance de la population (Lin et Ives 2003). Étant

un parasitoïde déjà commercialisé comme agent de lutte biologique (Plant-Prod Québec 2007), essentiellement dans les cultures en serre et bien connu des agronomes, il s'avère être facilement accessible pour les agriculteurs. Toutefois, jusqu'à maintenant, ce parasitoïde a démontré sa capacité à parasiter le puceron du soya uniquement en lieu clos. Des essais en champ de soya à plus grande échelle sont donc nécessaires afin d'évaluer sa capacité à se disperser et à parasiter le puceron du soya en conditions naturelles.

En dernier lieu, la lutte biologique par aménagement avec *Aphelinus certus* Yasnosh (Hymenoptera: Aphelinidae) se présente également comme option. Ce parasitoïde a été observé dans un champ de soya du Québec à l'été 2010 à Saint-Mathieu-de-Beloeil (V. Gariépy, communication personnelle). Cette espèce originaire d'Asie avait déjà été répertoriée aux États-Unis et en Ontario (Heraty *et al.* 2007, Heimpel *et al.* 2010). Frewin *et al.* (2010), ont démontré que le taux de parasitisme d'*A. certus* augmente avec la densité du puceron du soya en laboratoire. Toutefois, la biologie de cette guêpe parasitoïde demeure très peu connue. Ce parasitoïde étant établi depuis peu en Amérique du Nord, davantage d'informations nécessitent d'être connues. Entre autres, sur son écologie saisonnière, dont son synchronisme saisonnier et sa capacité à survivre à l'hiver, dans l'optique d'évaluer sa capacité à s'établir à long terme dans nos régions productrices de soya et accomplir un contrôle durable du puceron du soya.

Dans ce contexte, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- i) Le parasitoïde *B. communis* a la capacité de survivre aux conditions climatiques du Québec et possède un cycle saisonnier adapté à celui d'*A. glycines*.
- ii) *Aphidius colemani* a la capacité de se disperser et de parasiter le puceron du soya dans un champ de soya du Québec.
- iii) Le parasitoïde *A. certus* a la capacité de survivre aux conditions hivernales du Québec et son cycle saisonnier est adapté à celui du puceron du soya.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise est d'évaluer certains aspects de la biologie de trois espèces de parasitoïdes du puceron du soya pour ainsi déterminer leur potentiel comme agents de lutte biologique en Amérique du Nord.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- i) Déterminer la survie hivernale ainsi que la résistance au froid de *B. communis* et le synchronisme saisonnier, tant au printemps qu'à l'automne, du parasitoïde avec son hôte.
- ii) Déterminer la capacité de dispersion et de parasitisme d'*A. colemani* en conditions naturelles.
- iii) Déterminer le synchronisme saisonnier, tant au printemps qu'à l'automne d'*A. certus* avec *A. glycines*, ainsi que sa résistance au froid, en évaluant sa survie hivernale en conditions naturelles et en laboratoire.

## **CHAPITRE 1 : Revue de littérature**



## 1.1 Problématique :

### 1.1.1 Le puceron du soya (*Aphis glycines*)

Le puceron du soya est un insecte originaire de l'Asie où la culture du soya se pratique depuis plusieurs siècles (Hymowitz 1970). Ce petit insecte phytophage présente deux modes de reproduction, sexué et asexué, qui alternent durant le cycle saisonnier (Wu *et al.* 2004) (Figure 1.1). Ce dernier débute par la ponte, à l'automne, d'un œuf sur un bourgeon de l'hôte primaire (Tableau II), soit le nerprun, *Rhamnus davurica* Pallas (Rosales: Rhamnaceae) (en Chine), *Rhamnus japonica* Maximowicz

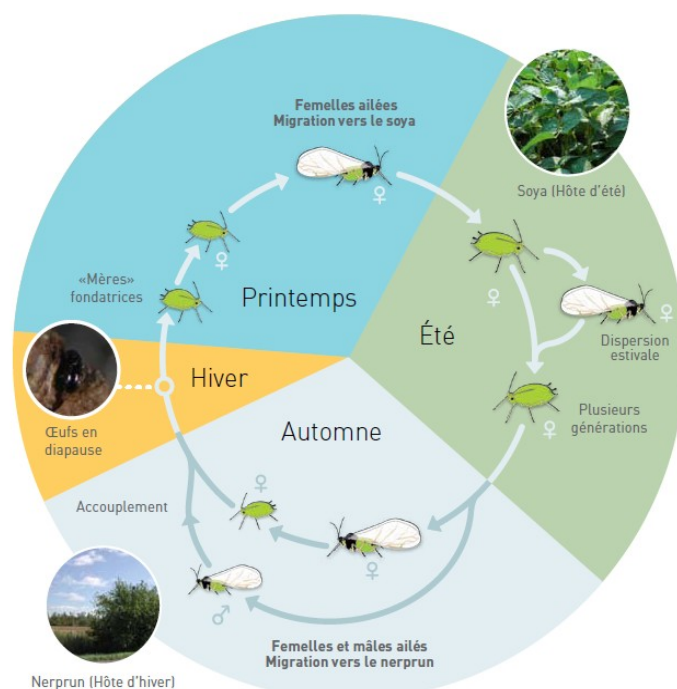


Figure 1.1: Le cycle sexué et asexué du puceron du soya (Jean *et al.* 2010)

(au Japon) et *Rhamnus cathartica* L. (en Amérique du Nord) (Voegtlin *et al.* 2004, Voegtlin *et al.* 2005), où il passe l'hiver en diapause. Au printemps, une nymphe éclot et se développe en femelle parthénogénétique aptère (femelle fondatrice). Les femelles fondatrices produisent une seconde

génération de femelles aptères, ce n'est qu'à la troisième génération que la majeure partie des femelles pondues sont ailées. À la fin juin, les femelles ailées migrent vers l'hôte secondaire, le soya (*Glycine max*) (Ragsdale *et al.* 2004). Durant tout l'été, les femelles se reproduisent par parthénogenèse (Wu *et al.* 2004). À l'automne,

elles produisent des individus sexués et ailés, femelles et mâles, qui migrent jusqu'à leur hôte primaire. Dans certaines régions de Chine, on observe parfois plus de 20 générations d'*A. glycines* sur soya par année (Wang *et al.* 1962, Li *et al.* 2000). Le puceron du soya n'est qu'un ravageur mineur dans ces régions puisque ses ennemis naturels maintiennent les populations de pucerons à de faibles densités (Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007). L'utilisation d'insecticides pour contrôler ce ravageur et prévenir des pertes économiques demeure limitée en Asie (Wu *et al.* 2004).

**Tableau II** : Hôtes primaires et secondaires répertoriés du puceron du soya en Asie et en Amérique du Nord (adapté de Labrie 2010).

Nom commun	Nom latin	Type d'hôte	Région hôte	Références
Nerprun cathartique	<i>Rhamnus cathartica</i> (L.)	primaire	Amérique du Nord	1; 2; 4
Nerprun alnifolié	<i>R. alnifolia</i> L'Héritier	primaire	Amérique du Nord	1; 2; 3; 4
Nerprun bourdaine	<i>R. frangula</i> (L.)	primaire	Amérique du Nord	2
Nerprun lancéole	<i>R. lanceolata</i> Pursh	primaire	États-Unis	2
Nerprun de Caroline	<i>R. caroliniana</i> Walter	primaire	États-Unis	2
Nerprun	<i>R. davurica</i> Pallas	primaire	Chine	3
Nerprun japonais	<i>R. japonica</i> Maximowicz	primaire	Japon	3
Soya	<i>Glycines max</i> L.	secondaire	Amérique du Nord	5
Soja	<i>G. soja</i> Sieb et Zucc.	secondaire	Amérique du Nord	5
Kudzu	(Roxb.)	secondaire	Amérique du Nord	2; 6
Kudzu	<i>Desmodium intortum</i> (P. Mill.)	secondaire	Amérique du Nord	2; 6
Trèfle des prés	<i>Trifolium pratense</i> L.	de passage	Amérique du Nord	7; 10
Trèfle d'Alexandrie	<i>T. alexandrinum</i> L.	de passage	Amérique du Nord	7
Trèfle incarnat	<i>T. incarnatum</i> L.	de passage	Amérique du Nord	7
Trèfle Kura	<i>T. ambiguum</i> M. Bieb.	de passage	Amérique du Nord	7
Méililot blanc	<i>Melilotus alba</i> Medikus	de passage	Amérique du Nord	7
Méililot officinal	<i>M. officinalis</i> L. Lam	de passage	Amérique du Nord	7
Haricot	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	de passage	Amérique du Nord	7; 10
Luzerne	<i>Medicago sativa</i> L.	de passage	Amérique du Nord	7; 10
Tabac	<i>Nicotiana tabacum</i> L.	de passage	Amérique du Nord	8
Pomme de terre	<i>Solanum tuberosum</i> L.	de passage	Amérique du Nord	9

Références: 1: Yoo *et al.* 2005; 2: Voetglin *et al.* 2005; 3: Voetglin *et al.* 2004; 4: Fox *et al.* 2004; 5: Venette et Ragsdale 2004; 6: Blackman et Eastop 2000; 7: Alleman *et al.* 2002; 8: Fang *et al.* 1985; 9: Davis et Radcliffe 2008; 10: Hill *et al.* 2004

Le puceron du soya a été observé pour la première fois en Amérique du Nord en 2000 dans l'État du Wisconsin, États-Unis (Alleman *et al.* 2002, DiFonzo et Hines 2002). Par la suite *A. glycines* s'est dispersé de façon fulgurante en Amérique

et a colonisé 21 états américains ainsi que trois provinces canadiennes, dont le Québec (Hunt *et al.* 2003, Ragsdale *et al.* 2004, Venette et Ragsdale 2004). Au Québec, le puceron du soya a été rapporté pour la première fois en 2001, dans un champ en Montérégie. En 2002, il a été trouvé dans les 54 champs échantillonnés de soya répartis dans les neuf principales régions productrices du Québec (Brodeur 2009). Durant cette phase initiale de dispersion, il était impossible de certifier si le puceron du soya était établi de façon permanente au Québec ou s'il migrerait à chaque saison en provenance des États-Unis. Au Canada, le fait que le puceron était observé en juin suggérait que les champs de soya de ces régions étaient colonisés par des émigrants ailés en provenance de champs de soya d'autres régions (Ragsdale *et al.* 2004). Toutefois au printemps 2005, des œufs de puceron ont été découverts sur *Rhamnus cathartica* en Montérégie (Roy et Lachance 2005). *Aphis glycines* aurait donc une écologie similaire à celle observée en Chine, à l'exception de son hôte primaire qui semble englober plusieurs espèces de *Rhamnus* en Amérique du Nord (Ragsdale *et al.* 2004, Voegtlin *et al.* 2004).

En Amérique du Nord cet insecte ravageur arrive sur son hôte secondaire généralement au mois de juin (Parent 2006, Parent 2007). Toutefois ce n'est qu'au mois d'août que les densités du puceron sont maximales dans les champs de soya du Québec (Breault *et al.* 2007, Rhainds *et al.* 2008, Breault *et al.* 2009, Parent 2009).

### 1.1.2 Les dommages

*Aphis glycines* peut causer d'importantes pertes économiques suite aux divers dommages qu'il inflige directement ou indirectement aux plants de soya. Reproducteur de type r, le puceron peut rapidement atteindre des densités impressionnantes de population, ce qui augmente la probabilité d'occasionner divers dégâts aux cultures de soya. De part leur seule densité, les pucerons peuvent provoquer des pertes sérieuses dans la production de soya en diminuant la biomasse et la qualité des fèves, et en affectant leur teneur en huile et protéines (Ragsdale *et al.* 2004, Beckendorf *et al.* 2008). Plus le plant attaqué est jeune, plus les dommages causés pour une même densité de pucerons sont importants (Rhainds *et al.* 2007). De plus, les pucerons du soya peuvent affecter indirectement les rendements de la culture en agissant comme vecteur de maladies virales, telles la mosaïque de la luzerne, la mosaïque du soya et la mosaïque du haricot jaune (Halbert *et al.* 1981, Clark et Perry 2002, Burrows *et al.* 2005, Davis *et al.* 2005, Wang *et al.* 2006). Finalement, l'excrétion de miellat par les pucerons peut causer d'autres dommages via la croissance de fumagine (*Fumago salicina* Ful.), une moisissure pouvant réduire la capacité photosynthétique des plants de soya et parfois même provoquer l'asphyxie de la plante (Lin *et al.* 1993, Hirano *et al.* 1996, Leroy *et al.* 2009).

### 1.1.3 Insecticides

Des pulvérisations d'insecticides sont parfois nécessaires au Québec afin de réduire les densités de population d'*A. glycines* dans une culture qui traditionnellement en était exempte. Malgré l'existence de plusieurs insecticides

contre les pucerons disponibles sur le marché (Ostlie 2001, Sage pesticides 2011) son arrivée dans nos régions a mené à l'homologation de deux matières actives depuis 2002, soit le cyhalothrine-lambda (Matador 120 EC) et l'extension d'homologation du diméthoate (Cygon 480 AG) (Roy 2008, Brodeur 2009). Depuis 2003, une hausse de l'utilisation des insecticides dans les champs de soya a été observée (Heimpel et Shelly 2004). Aux États-Unis, il a été observé que l'utilisation tôt en saison de pesticides entraîne généralement d'autres traitements, plus tard en saison, car la destruction des populations d'ennemis naturels favorise la résurgence de ravageurs secondaires ou de nouvelles infestations de puceron du soya (Myers *et al.* 2005). Facteur important à considérer, en plus des risques de développement de résistance (Haubruge et Amichot 1998), les pesticides de synthèse peuvent être dommageables pour la santé humaine et l'environnement (Jeyaratnam 1990, Multigner 2005).

Face à ce problème, la lutte biologique s'avère une solution efficace, économique et durable pour le contrôle du puceron du soya en Amérique du Nord. Des études ont été réalisées pour une meilleure compréhension des facteurs qui agissent sur les populations du puceron, dont la présence de prédateurs, de parasitoïdes et d'entomopathogènes ainsi que leur rôle sur les populations du puceron en Asie. Ceux-ci ayant démontré la capacité de maintenir de faibles densités d'*A. glycines*, l'identification d'ennemis naturels présents en Amérique du Nord s'amorça au Minnesota, au Michigan, au Kentucky, au Québec et en Ontario au début des années 2000 (Ragsdale *et al.* 2011). Ces études ont permis de comparer les

différences entre la dynamique des guildes présentes en Amérique du Nord et en Asie.

## **1.2 Ennemis naturels :**

### **1.2.1 Prédateurs**

On observe plusieurs espèces de prédateurs d'*A. glycines* dans les champs de soya en Chine, soit respectivement 12 et 13 espèces en 2002 et 2003-2004 (Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007), appartenant à six familles : Linyphiidae, Coccinellidae, Syrphidae, Anthocoridae, Nabidae et Chrysopidae (Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007). L'abondance de ces espèces varie tout au long de la saison. Individuellement, chacune de ces espèces ne joue pas un rôle déterminant dans le maintien de faibles densités des populations du puceron du soya, par contre, la guildes des ennemis naturels semble réduire significativement les infestations (Van Den Berg *et al.* 1997, Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007).

En Amérique du Nord, diverses études réalisées dans différentes régions, ont décrit les guildes de prédateurs et quantifié l'abondance respective des espèces. Les espèces échantillonnées varient selon les régions, mais restent essentiellement caractéristiques de la guildes des aphidiphages. Les études menées en Indiana, au Michigan et au Kentucky ont toutefois observé la prédominance de trois espèces : *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera : Coccinellidae), *Coccinella septempunctata*

L. (Coleoptera : Coccinellidae) et *Orius insidiosus* Say (Hemiptera : Anthocoridae) (Fox *et al.* 2004, Rutledge *et al.* 2004, Fox *et al.* 2005, Costamagna et Landis 2006, Costamagna et Landis 2007, Costamagna *et al.* 2008). Dans tous les cas, les communautés de prédateurs généralistes ont démontré leur capacité à réduire les densités de pucerons du soya (Fox *et al.* 2004, Rutledge *et al.* 2004, Fox *et al.* 2005, Nielsen et Hajek 2005, Rutledge et O’Neil 2005, Costamagna et Landis 2006, Desneux *et al.* 2006, Costamagna *et al.* 2007, Donaldson *et al.* 2007).

Au Québec, cinq familles d’insectes aphidophages ont été échantillonnées en 2002 et 2003 dans les champs de soya infestés par *A. glycines* : Coccinellidae, Anthocoridae, Chrysopidae, Syrphidae et Nabidae (Mignault *et al.* 2006). Ces prédateurs généralistes jouent un rôle prépondérant dans le contrôle biologique des pucerons du soya au Québec (Rhainds *et al.* 2007). Les espèces de Coccinellidae prédominantes dans les champs de soya du Québec diffèrent quelque peu de celles observées dans le ‘Midwest’ des États-Unis. L’espèce la plus abondante en 2002 et 2003 observée au Québec fût *Propylea quatuordecimpunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae) suivie de *H. axyridis* (Mignault *et al.* 2006). Le cas d’*O. insidiosus* diffère également entre ces deux régions, puisqu’au Québec il est rarement récolté dans les champs de soya. Au Québec, les espèces d’aphidophages que l’on retrouve dans les champs de soya sont des espèces qui colonisent aussi les champs de maïs (Wang et Ba 1998). Le maïs et le soya sont cultivés en alternance au Québec, ce qui peut être déterminant pour la présence de la guildes de prédateurs que l’on retrouve dans les champs de soya.

### 1.2.2 Parasitoïdes

Dans les champs de soya en Asie, trois principaux types de parasitoïdes associés à *A. glycines* sont présents : *Lysiphlebus* sp. (Hymenoptera : Braconidae), *Binodoxys communis* (Gahan), et *Aphelinus* sp (Hymenoptera : Aphelinidae). Des essais en cages d'exclusions ont permis de démontrer l'importance que joue ces parasitoïdes dans le maintien de faibles densités de pucerons. En présence seule de parasitoïdes, la densité de pucerons était 28 fois plus élevée qu'en absence de cages. Alors qu'en absence de tous ennemis naturels (cage d'exclusion) la densité du puceron du soya était 68 fois plus élevée qu'en conditions naturelles. Ceci a permis de démontrer l'effet répresseur des parasitoïdes sur la densité de pucerons (Miao *et al.* 2007).

En Amérique du Nord, suite à l'introduction du puceron du soya, très peu de pucerons momifiés étaient retrouvés dans les champs. Toutefois, au fil des ans, certains parasitoïdes indigènes ou naturalisés semblent s'adapter au puceron du soya. Ainsi, dans l'État de New York, des parasitoïdes ont été retrouvés parasitant *A. glycines*, soit *Aphidius* sp. et deux espèces de *Praon* sp. (Nielsen et Hajek 2005). Dans l'État du Michigan huit espèces appartenant à deux familles de parasitoïdes (Hymenoptera) (famille des Braconidae : *Lysiphlebus testaceipes* Cresson, *Aphidius ervi* Haliday, *Diaeretiella rapae* M'Intosh, *Aphidius colemani* Viereck, *Binodoxys kelloggensis* Pike Sary, Sary et Brewer, *Praon* sp. et famille des Aphelinidae *Aphelinus asychis* Walker (Aphelinidae), *Aphelinus albipodus* Hayat et Fatima) ont été retrouvées parasitant *A. glycines* (Kaiser *et al.* 2007, Pike *et al.* 2007, Noma et



Brewer 2008, Brewer et Noma 2010). Au Québec, des individus de la famille des Braconidae ont été échantillonnés dans les champs de soya (Roy et Leclerc 2005). En Asie le taux de parasitisme est généralement supérieur à 10% (Miao *et al.* 2007, Heimpel *et al.* 2010), alors qu'en Amérique du Nord il excède rarement le 1% (Kaiser *et al.* 2007, Noma et Brewer 2008). L'absence de ce type d'ennemis naturels en Amérique du Nord pourrait contribuer à expliquer les explosions sporadiques des densités de pucerons dans les champs de soya.

### 1.2.3 Entomopathogènes

L'entomopathogène du puceron du soya le plus commun en Chine est *Entomophthora fresenii* Nowak (Entomophthorales: Entomophthoraceae), un champignon majoritairement présent lorsque le climat est très humide et que les populations de pucerons sont élevées dans les champs (Wu *et al.* 2004).

Dans l'état de New York, six espèces de champignons entomopathogènes ont été observées : *Conidiobolus thomboide* Drechsler (Entomophthorales: Ancylistaceae), *Entomophthora chromaphidis* Burger et Swain (Entomophthorales: Entomophthoraceae), *Pandora neoaphidis* Humber (Entomophthorales: Entomophthoraceae), *Pandora* sp., *Zoophthora occidentalis* Batko (Entomophthorales: Entomophthoraceae), *Neozygites fresenii* Remaud. et Keller (Entomophthorales: Neozygitaceae) et *Lecanicillium lecanii* Gams et Zare (Hypocreales: Clavicipitaceae) (Nielsen et Hajek 2005). Au Minnesota, quatre espèces furent également identifiées,

la plus importante étant *Pandora neoaphidis* (Rutledge *et al.* 2004), une espèce également observée au Québec (Roy et Leclerc 2005). Les effets de ces entomopathogènes sur les densités de puceron en Amérique du Nord demeurent peu documentés.

### **1.3 Initiative américaine :**

Suite aux recensements effectués en Asie et en Amérique du Nord, des chercheurs Américains et Canadiens ont envisagé l'utilisation de parasitoïdes du puceron du soya en Amérique du Nord, compte tenu du rôle qu'ils jouent dans le maintien des densités du puceron en Chine (Heimpel *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007). De ce fait, un programme de lutte biologique classique pour le contrôle des populations d'*A. glycines* a été envisagé, par l'introduction d'un parasitoïde dont l'on souhaite la naturalisation pour un contrôle à long terme de ce ravageur. Contrairement aux prédateurs généralistes, les parasitoïdes ont pour avantage de synchroniser leur cycle à celui de leur hôte et possèdent une forte capacité à repérer de faibles populations d'hôtes permettant ainsi un contrôle tôt en saison (Murdoch *et al.* 1985). De plus, ils peuvent répondre rapidement aux changements de densités de populations et subsister lors de faibles présences d'hôtes, toutes des caractéristiques recherchées chez un agent de lutte biologique (Murdoch *et al.* 1985). De ce fait, les parasitoïdes pourraient effectuer un contrôle complémentaire et durable à celui des ennemis naturels déjà présents en Amérique du Nord.

### 1.3.1 Lutte biologique classique

Des explorations ont été effectuées en Chine, au Japon et en Corée du Sud afin de trouver des parasitoïdes qui pourraient, éventuellement, être utilisés en lutte biologique classique. Les individus prélevés ont été envoyés aux États-Unis et mis en quarantaine dans l'intention d'étudier leur potentiel comme agent de lutte en Amérique du Nord. Parmi ces espèces, *B. communis* a été retenu comme agent de biocontrôle potentiel contre le puceron du soya (Ragsdale *et al.* 2011), puisqu'il possède l'ensemble des caractéristiques biologiques recherchées chez les agents de lutte biologique, dont sa spécificité pour le puceron du soya (Wyckhuys *et al.* 2007, Desneux *et al.* 2009, Wyckhuys *et al.* 2009). De plus, selon Wyckhuys *et al.* (2008), *B. communis* parasite et se développe avec succès dans tous les différents stades de développement (nymphe et adulte, aptère ou ailé) d'*A. glycines*. Une étude réalisée par Asplen *et al.* (2011), a démontré en laboratoire que *B. communis* a la capacité de se développer tant sur des nymphes de pucerons du soya de stade quatre gynopares (migrant ou non) ainsi qu'à l'intérieur d'adultes gynopares ailés. Ce parasitoïde possède donc la capacité de parasiter *A. glycines* sur son hôte primaire et secondaire.

Aux États-Unis, les lâchers de *B. communis* ont été approuvés par le US Department of Agriculture en 2007, suite à des tests de spécificité. Des tests furent d'abord effectués en laboratoire sur 20 espèces de pucerons et le taux de parasitisme était inférieur à 1% chez 10 espèces, entre 3 et 50% pour 9 autres espèces et de 58% pour *A. glycines* (voir Ragsdale *et al.* 2011). *Binodoxys communis* a démontré sa capacité à parasiter trois espèces indigènes, *Aphis monardae* Oestlund, *A. oestlundii*

Gillette et *A. asclepiadis* F. (Hemiptera : Aphididae). Toutefois, des études subséquentes ont démontré l'incapacité de *B. communis* à parasiter ces espèces en conditions naturelles, dû à la présence de filtres écologiques (Desneux *et al.* 2009). Dans le cas d'*A. monardae*, le taux de parasitisme est diminué par la présence de fourmis qui attaquent les parasitoïdes ainsi que les pucerons parasités. Les pucerons se situant sur les boutons de fleurs sont davantage protégés contre les parasitoïdes que ceux logés sur les sections végétatives (Wyckhuys *et al.* 2007, Wyckhuys *et al.* 2009). Chez les deux autres espèces, les barrières sont principalement spatiales et temporelles (Wyckhuys *et al.* 2009).

Dans l'optique d'effectuer une lutte biologique au Québec pour le contrôle du puceron du soya, des connaissances supplémentaires sur la biologie de *B. communis* sont nécessaires avant de procéder à des relâchers: écologie saisonnière en automne (période d'entrée en diapause) et au printemps (période d'émergence) ainsi que sa capacité de survivre aux conditions hivernales.

#### **1.4 Projet PSIA :**

Suite à la mise sur pied de l'initiative américaine, à laquelle participe des chercheurs canadiens, le Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation du Québec a emboité le pas via le programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire (PSIA). D'autres espèces de parasitoïdes ont été

envisagées pour le contrôle du puceron du soya au Québec dans le cadre de programme de lutte biologique inoculative et de lutte biologique par aménagement.

#### 1.4.1 Lutte biologique inoculative

Dans le cas de la lutte biologique inoculative, il s'agit d'une guêpe parasitoïde déjà bien connue en lutte biologique, soit *Aphidius colemani*. Ce parasitoïde, originaire du nord de l'Inde et du Pakistan, se serait répandu dans d'autres régions: Asie centrale, Méditerranée, Afrique (Messing et Rabasse 1995). Cet agent de lutte biologique est fréquemment introduit dans les serres contre une quarantaine d'espèces de pucerons, mais principalement contre *Aphis gossypii* Glover et *Myzus persicae* Sulzer (Homoptera : Aphididae) (Eilenberg *et al.* 2000, Biobest Biological systems 2010). Cette espèce de parasitoïde fut introduite au cours des années 1990 en Amérique du Nord pour contrôler le puceron du blé (*Diuraphis noxia* Mordvilko (Homoptera : Aphididae)), sans grand succès (Elliott *et al.* 1995, Burd *et al.* 2001). Celle-ci s'est tout de même établi à quelques endroits (Lin et Ives 2003).

Lin et Ives (2003) ont évalué, en laboratoire, la capacité d'*A. colemani* à parasiter le puceron soya. Ils ont démontré la préférence de ce parasitoïde pour les individus de grandes tailles, ce qui aurait pour effet de réduire considérablement les taux de croissance des populations d'*A. glycines*, puisqu'ils s'attaquent préférentiellement aux individus les plus féconds dans la population. Chacón *et al.*

(2008) ont relâché ce parasitoïde dans des cages en champ de soya et démontré via des analyses de contenu gastrique de prédateurs généralistes que *A. colemani* était sujet à la prédation intragilde par *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera : Coccinellidae). Malgré tout, il semble qu'*A. colemani* a contribué à supprimer les populations d'*A. glycines* en parallèle à l'action des prédateurs généralistes présents.

De plus, *A. colemani* s'est introduit accidentellement dans une chambre de croissance de l'Institut de recherche en biologie végétale de Montréal contenant une colonie du puceron du soya où il démontra une capacité étonnante à parasiter celui-ci (observation, J. Doyon). En un mois, le parasitoïde avait pratiquement décimé la totalité de la colonie d'*A. glycines*. À la lumière de ces faits, l'utilisation d'*A. colemani* comme agent de lutte contre le puceron du soya au Québec fut sérieusement envisagée.

Toutefois pour une même espèce de puceron, le taux de parasitisme d'*A. colemani* varie selon l'espèce ou le cultivar de la plante hôte (Messing et Rabasse 1995, Kalule et Wright 2004). De ce fait, même si *A. colemani* a démontré sa capacité à parasiter *A. glycines* en laboratoire, son utilisation comme agent de lutte dans les champs de soya au Québec reste à vérifier.

#### 1.4.2 Lutte biologique par aménagement

Quelques études, réalisées en champ, sur les espèces d'ennemis naturels d'*A. glycines* en Amérique du Nord ont démontré la présence, depuis 2005, d'*Aphelinus certus*, une espèce de guêpe parasitoïde originaire d'Asie possiblement introduite accidentellement en Amérique (Heraty *et al.* 2007, Heimpel *et al.* 2010). Dans la région de la Montérégie au Québec, cette espèce de parasitoïde fut échantillonnée et formellement identifiée pour la première fois en 2010 (Véronique Gariépy, observation personnelle). Étant une espèce déjà présente en champs, elle a démontré sa capacité à détecter et parasiter de faibles populations du puceron de soya au cours de l'été 2010. Un taux de parasitisme de 51% a été observé sur des plants de soya sentinelles infestés par *A. glycines* et laissés au champ lors d'essais préliminaires avec *A. certus*. De plus, Frewin *et al.* (2010) ont démontré que ce parasitoïde a une réponse densité-dépendante vis-à-vis de son hôte. On observe un accroissement du taux de parasitisme lors d'une augmentation de la densité d'*A. glycines*, alors qu'une diminution de la population du puceron entraîne une réduction du taux de parasitisme. Ce parasitoïde semble devenir un joueur clé dans le contrôle d'*A. glycines* en Amérique du Nord, malgré une faible spécificité pour son hôte (K. Hopper, communication personnelle). Dans le but de favoriser sa présence dans les champs de soya ainsi que d'évaluer son véritable potentiel en tant qu'agent de contrôle, davantage d'informations sur son écologie doivent être recueillies.

## **CHAPITRE 2**

**Why two species of soybean aphid parasitoids showed promise in the laboratory but failed under field conditions.**



## **Why two species of soybean aphid parasitoids showed promise in the laboratory but failed under field conditions.**

Véronique Gariépy<sup>1</sup>, Guy Boivin<sup>2</sup>, Michèle Roy<sup>3</sup> & Jacques Brodeur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université de Montréal, 4101 rue Sherbrooke est, Montréal, Québec, Canada H1X 2B2

<sup>2</sup> Agriculture and Agri-Food Canada, 430 blv Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada J3B 3E6

<sup>3</sup> Direction des services technologiques, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, Canada G1P 3W8

### **Corresponding author**

Jacques Brodeur  
Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université de Montréal  
4101 rue Sherbrooke est  
Montréal, Québec, H1X 2B2, Canada

**Abstract:**

Following the rapid spread of the soybean aphid, *Aphis glycines* in North America in the early 2000's, biological control has been identified as a cost-effective approach for management of soybean aphid populations. Two parasitoid species *Binodoxys communis* and *Aphidius colemani* have been considered as promising candidates for classical and inundative biological control, respectively. The objectives of the present study were to determine the overwintering capacity of *B. communis* under climatic conditions prevailing in Québec, Canada, and to measure parasitism and dispersion capacity of *A. colemani* when released in soybean fields. Field and laboratory assessments showed that the Chinese *B. communis* strain we tested has a very poor capacity to enter in diapause (< 0.8%) and thus to establish in North America. *Aphidius colemani* did not show strong potential to control *A. glycines*. Following the release of approximately 5 600 females, only 113 mummies were recovered within a radius of 60 m from the release point. Although both promising under controlled environments, the Chinese *B. communis* strain and the *A. colemani* commercialised strain did not show strong potential to control *A. glycines* populations in soybean fields.

**Keywords:** *Aphis glycines*, *Binodoxys communis*, *Aphidius colemani*, biological control, parasitoid dispersion

## 2.1 Introduction:

Native to Asia, the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura (Homoptera: Aphididae) is a holocyclic and heteroecious species, alternating from primary (buckthorn; *Rhamnus* spp.) to secondary (soybean; *Glycine max* (L.) Merrill) hosts. This invasive species was first observed in North America in 2000 and has rapidly spread through all soybean growing areas in Canada and United States (Venette and Ragsdale 2004), where it is now considered as the most important pest of soybeans (Ragsdale *et al.* 2011). *Aphis glycines* can significantly reduce the yield of soybean, either directly through feeding (Macedo *et al.* 2003, Rhainds *et al.* 2007, Beckendorf *et al.* 2008) or indirectly through the transmission of viral diseases (Clark and Perry 2002, Wang *et al.* 2006).

Biological control has rapidly been identified as a cost-effective approach for management of soybean aphid populations. In Asia, *A. glycines* are regulated by more than 55 taxa of predators, parasitoids and entomophagous pathogens (Wu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007). In North America, a large number of studies showed that several species of predators responded to the invasion of soybean fields by *A. glycines* and play a major role in reducing aphid populations (see review by Ragsdale *et al.* 2011). For example, in Québec, Canada, field surveys and cage experiments showed that coccinellids, the most abundant predator group sampled (Mignault *et al.* 2006), together with other aphidophagous predators, can suppress *A. glycines* populations and mitigate their impact on soybean plants (Rhainds *et al.* 2007).

However, both in Canada and United States, indigenous and naturalized species of aphid parasitoids do not appear so far to play a major role in reducing populations of the exotic *A. glycines*, with parasitism levels typically below 1% or nil (reviewed by Ragsdale *et al.* 2011).

In this context, classical biological control using Asian parasitoids has been considered as a promising avenue to enhance the overall efficacy of *A. glycines* natural enemies in North America (Heimpel *et al.* 2004). Following exploration in Asia, host specificity studies, and experiments to assess potential efficacy as biological control agent of the soybean aphid, *Binodoxys communis* (Gahan) (Hymenoptera: Braconidae) has been identified as a promising candidate and a permit from USDA-APHIS was granted for field release in the United States (Wyckhuys *et al.* 2007). However, to our knowledge (see also Ragsdale *et al.* 2011), *B. communis* has so far failed to establish stable populations following multiple releases in northcentral United States. Several nonexclusive explanations may account for the perceived failure of establishment of this exotic parasitoid: incapacity to overwinter, low dispersal ability, intraguild predation, genetic bottlenecks and Allee effects in released parasitoid populations (Ragsdale *et al.* 2011).

Another potential biological control approach would be to inoculate soybean fields early in the season with the parasitoid *Aphidius colemani* Viereck. Under laboratory conditions this species attacked, developed and reproduced successfully

on *A. glycines* (Lins and Ives 2003). Under greenhouse conditions *A. colemani* also showed the capacity to significantly reduce *A. glycines* populations (J. Doyon, unpublished data). Furthermore, this species is already commercialized at low cost as a biological control agent of a number of aphid pest species, mainly for greenhouse crops.

The first objective of the present study was to obtain a better understanding of the seasonal biology of *B. communis* under climatic conditions prevailing in Québec, Canada. Parasitoid overwintering capacity was determined under insectary and laboratory conditions by first measuring the capacity of *B. communis* to enter diapause as prepupa within the mummified aphid. The second objective was to measure parasitism rate on *A. glycines* as well as dispersion capacity of *A. colemani* when released in soybean fields.

## 2.2 Material and methods:

### 2.2.1 Diapause induction in *B. communis*

A soybean aphid colony was established from individuals collected near Saint-Mathieu-de-Beloeil, Québec, in 2010. *Aphis glycines* was maintained on seedlings of soybean, *Glycine max* (L.) Merrill, at  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ , 50-70% relative humidity, and under a photoperiod 16L:8D. A parasitoid colony was established at the Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), Montréal. This colony was initiated in 2009 from individuals provided by Georges Heimpel, University of Minnesota. This strain of *B. communis* was originally collected in 2002 by K. Hoelmer, K. Chen and W. Meikle in soybean fields near Harbin ( $45^\circ41' 27''$  N,  $126^\circ37' 42''$  E) and in Suihua County ( $45^\circ36' 28''$  N,  $126^\circ57' 49''$  E) in the Chinese province of Heilongjiang (Wyckhuys et al. 2008). Voucher specimens are stored at the USDA-ARS Beneficial Insect Introduction Research Laboratory in Newark, Delaware, USA. The parasitoid culture was maintained on *A. glycines* under the same rearing conditions as the aphid colony.

The percentage of *B. communis* entering diapause under natural conditions was determined at the end of the growing season in 2009 following the method used by Brodeur and McNeil (1994). Under laboratory conditions, 150 third-fourth instar *A. glycines* were exposed for 24 h to 30 mated *B. communis* females. Parasitised aphids were then distributed on soybean plants in a cage and reared under ambient temperature, humidity and light conditions in an outdoor insectary at the IRBV. Once

aphid mummies had formed they were collected, put in gelatine capsules, and observed daily for emergence. Mummies that did not give rise to parasitoid adults were dissected 14 d following peak emergence, and their contents classified as either diapausing prepupae or dead parasitoids. This experiment was repeated twice with parasitized aphids being exposed to ambient natural conditions on the 21<sup>st</sup> and 28<sup>th</sup> of August.

We also tested the capacity of *B. communis* to enter diapause under laboratory conditions known to induce diapause in aphid parasitoid species from temperate regions (Brodeur and McNeil 1989, Yu 1992). In this instance, soybean plants infested with a few hundreds soybean aphids from various stages were exposed to 150 2-3-d-old mated *B. communis* females for 24 h. Parasitoid females were then removed from the cage and parasitized aphids were reared in growth chambers under the following three conditions:  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  and 12:12 (L:D),  $13 \pm 1^\circ\text{C}$  and 12:12 (L:D),  $13 \pm 1^\circ\text{C}$  and 10:14 (L:D); all at  $60 \pm 10\%$  RH. Following mummification, the mummies were treated in the same manner as those exposed to ambient conditions in the insectary.

### 2.2.2 Field parasitism and dispersal of *A. colemani*

Field parasitism of *A. glycines* and spatial dispersal of *A. colemani* females in soybean fields were examined following the method used by Langholf *et al.* (2005) who measured the same parameters for the association *Myzus persicae*-*A. colemani*

on kohlrabi plants. We used sentinel plants (laboratory aphid infested soybean plants introduced under field conditions) because *A. glycines* was absent from the experimental field at the time of the experiment.

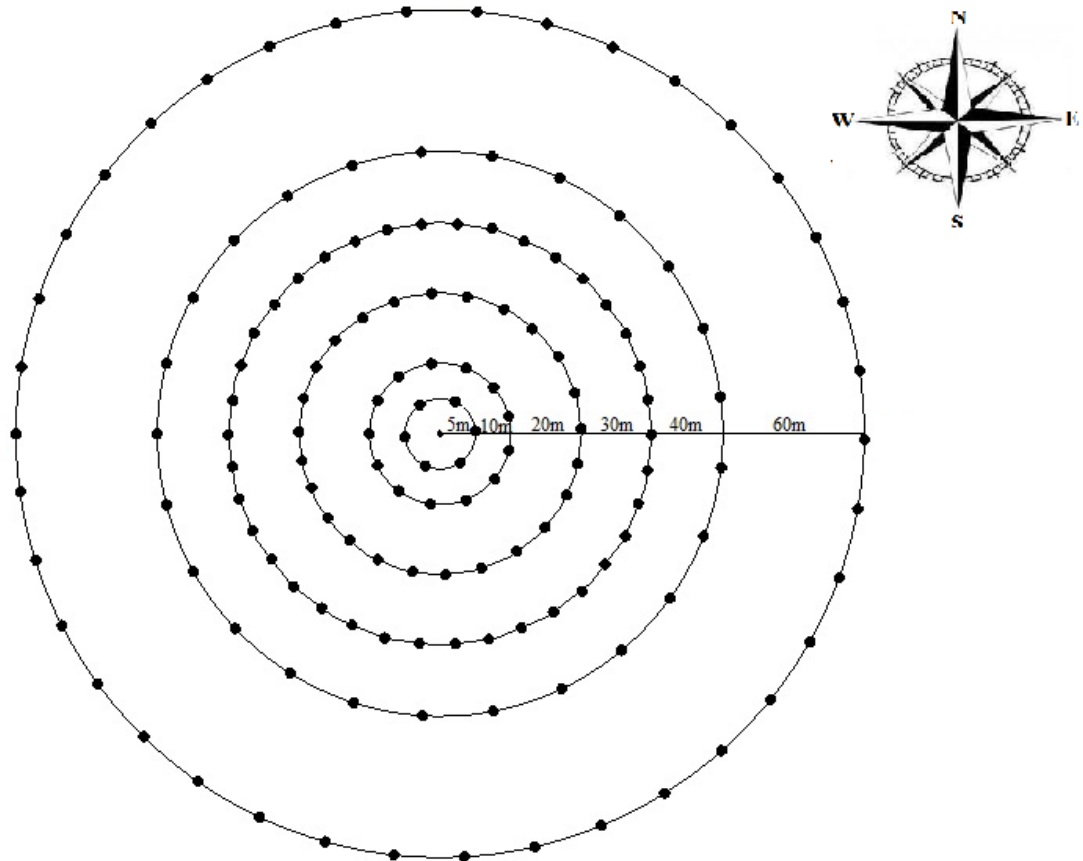
The experiment was conducted in 2010 at the experimental farm of the Centre de recherche sur les grains (CÉROM) Inc., at Saint-Mathieu-de-Beloeil (45°34'46.40''N et 73°14'23.89''O). Parasitoids were released in a plot measuring approximately 15 ha planted with soybean plants, var. S12-A5 (Syngenta), with a distance of 76.2 cm between rows and 4.1 cm plant spacing. No pesticide treatments were applied during the experiment.

Sentinel plants were prepared and introduced in the field as follow. Four days prior to be placed in the field, 146 soybean plants, var. Merrill, approximately 15 cm in height, each potted in 15.2 cm diameter pots, were infested with 10 parthenogenic *A. glycines* females coming from the laboratory colony. Each plant was then covered with a fine mesh bag and stored in a growth chamber at  $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , 16:8 (L:D) and  $50 \pm 10\%$  RH. These conditions provided plants infested with  $87 \pm 21$  aphids from all developmental stages once introduced in the field.

Sentinel plants were arranged in circles at distances of 5, 10, 20, 30, 40 and 60 m radius from a central parasitoid release point. For 5, 10, 20 and 30 m radii, infested



plants were spaced by a distance of 5 m, whereas for 40 and 60 m radii we used a 10 m spacing between plants (Figure 2.1). The next day, just prior parasitoid release, the mesh bags were removed and each sentinel plants was identified.



**Figure 2.1:** Experimental grid of soybean plants infested by *Aphis glycines* (sentinel plants) used for determining parasitism and dispersal of *Aphidius colemani*.

Each dot represents a sentinel plant around a central parasitoid release point. Distances between radius are shown.

*Aphidius colemani* was purchased by batch of 5000 individuals from Plant Products (Montréal, Québec). Mummies were placed in a large cage (35.5 cm x 25.5 cm x 35.0 cm) for parasitoid emergence and adults were fed with a sugar-water solution (20%). A sub-sample of mummies (2%) was used to determine percentage

of emergence and sex ratio. Percentage of emergence was estimated to range from 65 to 71 % between batches of parasitoids, while sex ratio (% female) ranged from 0.54 to 0.57. Accordingly, for each repetition, from 1720 to 2011 1-2-d-old females were released early in the morning by opening the cage at the central release point.

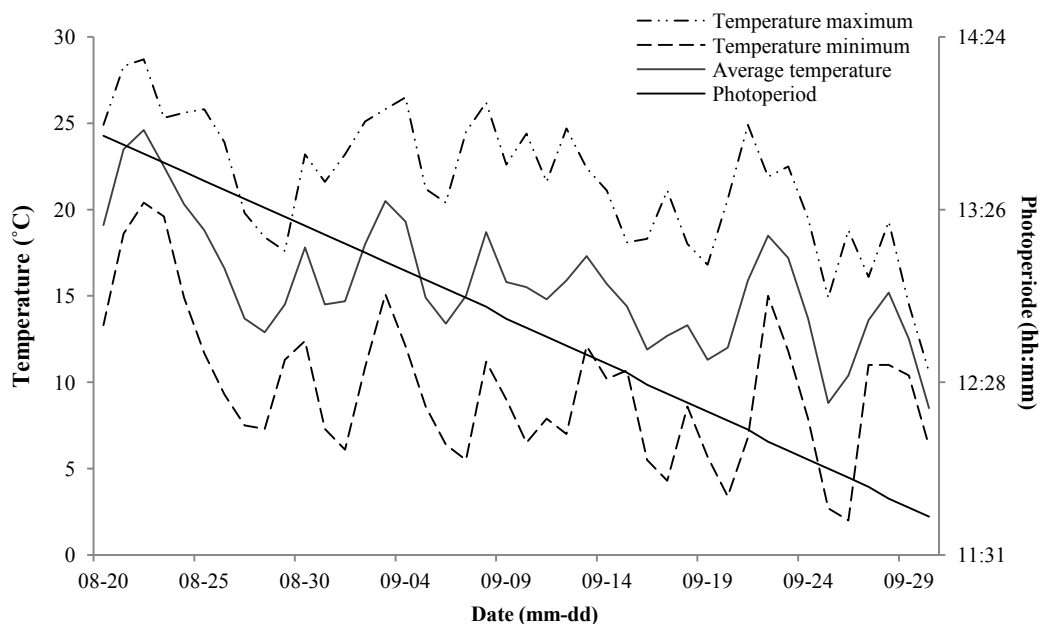
After 48 h, each sentinel plant was inspected for the presence of parasitoids and predators. The latter were counted, identified and removed from plants in situ. The plants were then covered by a mesh bag, brought back to the laboratory and placed under the same climatic conditions as described above. Mummies were recovered 4-8 d later, put individually in gelatine capsule and returned to the growth chamber until parasitoid emergence. All adults emerging from *Aphidius*-type mummies were considered to be *A. colemani* and to originate from released females. *Aphidius* parasitoids are very rarely observed parasitizing *A. glycines* in Québec (Roy and Leclerc 2005) and *A. colemani* does not naturally occur in northeastern North America, the species being confined to greenhouse environments.

The experiment was repeated three times on 5, 15 and 21 July, described below as test A, B and C, respectively. Climatic conditions were in all cases suitable to run the experiments, i.e. no rain or strong wind. Experimental arenas were distanced from each other by more than 200 m to prevent ‘parasitoid’ contamination between repetitions. Parasitism rates were too low to be meaningfully analysed using circular statistics.

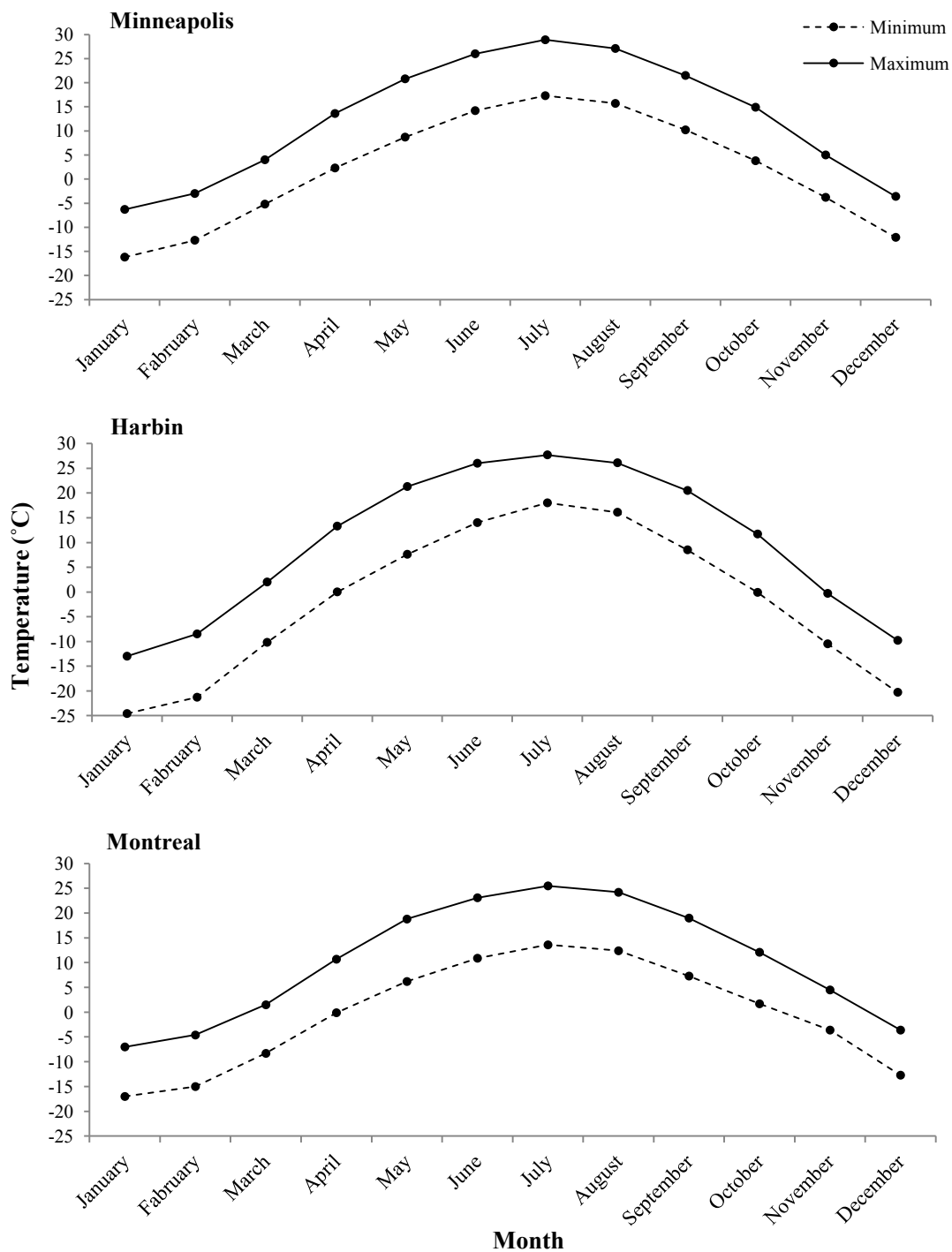
## 2.3 Results:

### 2.3.1 Diapause induction in *B. communis*

None of the developing parasitoids we exposed to ambient conditions on either August the 21<sup>st</sup> (N=38) or the 28<sup>th</sup> (N=13) entered diapause. We failed to produce large numbers of mummies containing *B. communis* because of unexpected high level of hyperparasitism in the insectary. Temperature and photoperiod recorded by Environnement Canada (2011) during the experiment are shown in Figure 2.2. Minimum and maximum average temperatures registered in Montréal were similar to those observed for Harbin (China), where the parasitoid was first collected, and for Minneapolis (Minnesota), where the parasitoid was released for the first time in North America (Figure 2.3).



**Figure 2.2:** Minimum, maximum and average temperature and photoperiod for Montréal during August and September 2009 at the Aéroport International Pierre Elliott Trudeau (Environnement Canada 2011).



**Figure 2.3:** Minimum and maximum average temperature for the areas of Minneapolis (USA; 1961-1990), Harbin (China; dates not available) and Montréal (Canada; 1971-2000) (Organisation météorologique mondiale 2011).

Similarly, the incidence of diapause was very low ( $< 0.8\%$ ) when *B. communis* was reared in the laboratory under temperature and photoperiodic conditions known to induce diapause in aphid parasitoids from temperate regions (Table III).

**Table III :** The incidence of emergence within the mummies and of prepupal diapause measured in the parasitoid *Binodoxys communis*, when reared under different temperature and photoperiodic conditions.

Temperature (°C)	Photoperiod (L:D)	n	Emergence (%)	Diapause (%)
15.0	12:12	116	91.2	0
15.0	12:12	155	83.2	0.8
13.0	10:14	146	81.5	0.8

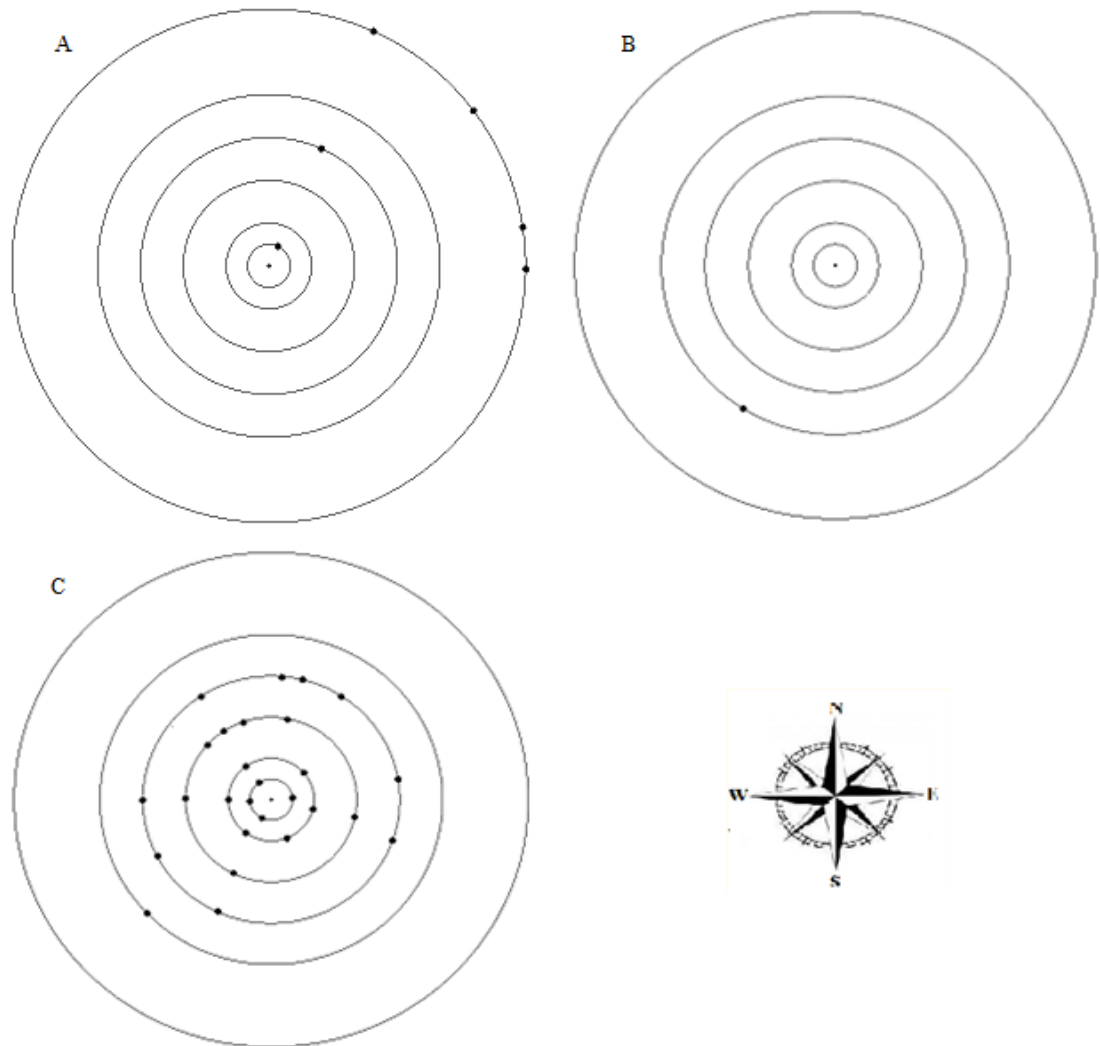
### 2.3.2 Field parasitism and dispersal of *A. colemani*

Parasitism and *A. colemani* dispersal were determined on the basis of *A. glycines* mummies observed on sentinel plants. Very few mummies were recovered on soybean plants, with totals of 8, 1, and 104 mummies of *A. colemani* for test A, B and C, respectively (Table IV). Primary parasitoid adults emerged from all collected mummies. Sentinel plants with mummies of *A. colemani* are shown on Figure 2.4. Of interest, a second aphid parasitoid species, *Aphelinus certus* Yasnosh (Hymenoptera: Aphelinidae), identified by Dr. K. Hopper, USDA, Delaware, was also observed in

our samples. In some cases, more than one mummy were found per plant. In test A, 8 mummies were distributed on 6 plants, while in test C, 104 mummies were distributed on 27 plants. In the first test, 6 out of 8 mummies were observed on sentinel plants that were the farthest away (60 m radius) from the central release point. In test C, mummies were rather evenly distributed within the first 30 m from where parasitoids were released.

**Table IV:** Number of mummies of *A. colemani* and *A. certus* observed on sentinel plants in each essay.

Species	Total of mummies / essay		
	A	B	C
<i>Aphidius colemani</i> Viereck	8	1	104
<i>Aphelinus certus</i> Yasnosh	2750	2053	1252



**Figure 2.4:** Spatial distribution of soybean sentinel plants (black dot) from which *A. glycines* mummies containing *A. colemani* were observed following tests conducted on 5, 15 and 21 July 2010 in a soybean field.

Radii are at 5, 10, 20, 30, 40 and 60 m from a central point where parasitoids were released.

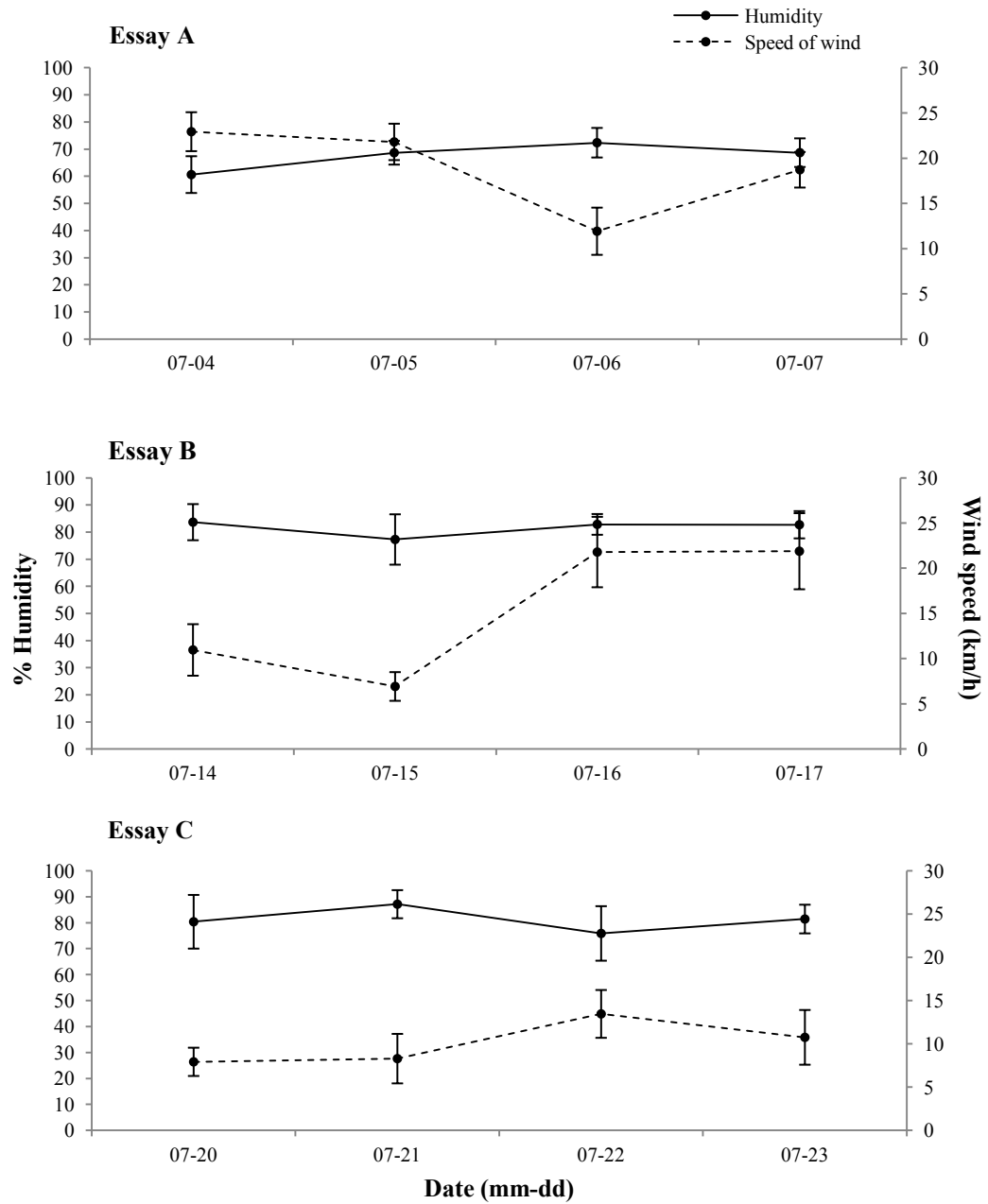
All predators we recovered sentinel plants had been identified (Table V). Predatory midges were the most abundant during essays B and C. The second most common predators were *Orius* sp. in essays A, B and *Propylea quatuordecimpunctata* in essay C.

**Table V:** Predator identity and abundance observed on the sentinel plants during three essays on *A. colemani* dispersal in a soybean field.

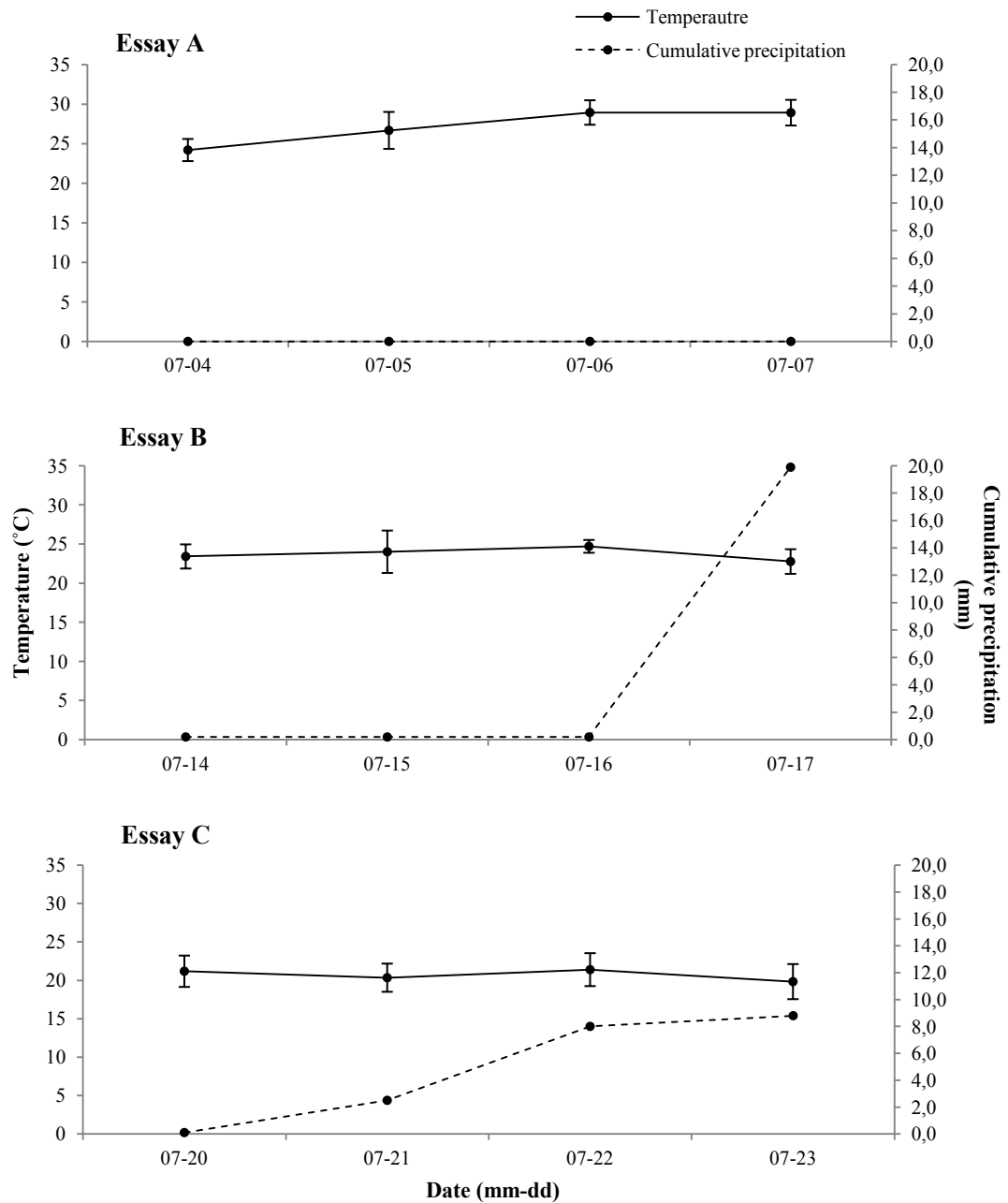
Species	Total of insects/essay		
	A	B	C
<i>Cecidomyie</i> (larva)	0	381	538
<i>Chrysoperla carnea</i> Stephens (larva)	0	1	0
<i>Coleomegilla maculata lengi</i> Timb.	4	0	0
<i>Coleomegilla maculata lengi</i> Timb.	0	0	5
<i>Coccinella septempunctata</i> L.	0	1	2
<i>Harmonia axyridis</i> Pallas	0	0	2
<i>Orius</i> sp. (larva)	1	0	0
<i>Orius</i> sp. (adult)	6	58	20
<i>Podisus</i> sp.	1	0	0
<i>Propylea quatuordecimpunctata</i> L.	0	7	44
Syrphe	0	0	6

The conditions recorded during the three essays for the dispersal of the parasitoid *A. colemani* are demonstrated at Figure 2.5 and 2.6.





**Figure 2.5:** Mean air relative humidity recorded at CÉROM and average wind speed recorded at the Aéroport de Saint-Hubert (Environnement Canada 2011) during the three essays.



**Figure 2.6:** Average temperature and cumulative precipitation recorded at CÉROM during the three essays.

## 2.4 Discussion:

Although mostly ‘negative’, our results are important to better design biological control strategies for the soybean aphid in North America. First, they help to understand why *B. communis* has so far likely failed to establish in North America following several releases in northcentral United States. Second, field data indicate that *A. colemani*, although promising under both laboratory and greenhouse conditions, appears to be a weak biological control agent of *A. glycines* in the soybean agroecosystem.

Based on field and laboratory assessments, we conclude that the Chinese *B. communis* strain we tested has a very poor capacity to successfully overwinter in Québec. Although sample sizes were low, *B. communis* failed to enter diapause when reared in an insectary at the end of the growing season. In contrast, Brodeur and McNeil (1994) showed in Québec that populations of *Aphidius nigripes* Ashmead, an indigenous parasitoid of the potato aphid, *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas), start to gradually enter diapause in mid-July, with 100% diapause observed in cohorts parasitized in early September. Under laboratory conditions, the incidence of diapause was approximately 98.7% when *A. nigripes* was reared at 15°C, 12:12 (L:D) (Brodeur and McNeil 1989) and >95% for two populations of *Aphelinus varipes* at 20°C, 12:12 (L:D) (Yu 1992). Our strain of *B. communis* completely failed to enter diapause under the same conditions. When temperature was reduced to 13°C, diapause was induced in a tiny fraction (0.8%) of tested individuals.

To our knowledge, nothing is known about the overwintering capacity of *B. communis* in Asia. There is no doubt, however, that this specialist parasitoid has evolved life history strategies to survive adverse climatic conditions and to ensure effective seasonal exploitation of the heteroecious *A. glycines*. The *B. communis* strain we tested had been collected in an area of China where climatic conditions are similar to the ones of northcentral United States (Ragsdale *et al.* 2011) and Québec (Figure 2.3). Although Asplen *et al.* (2011) discussed the importance of some additional factors that may affect the capacity of *B. communis* to induce diapause, such as host instar, host phenotype and host plant, these factors are not likely to have play a major role during our experiments. We therefore suggest that this strain has gradually lost its ability to enter diapause during the extended periods of first quarantine and next laboratory confinement during which it was continuously exposed to non-diapausing rearing conditions. This represents a strong selective pressure since the *B. communis* Chinese strain was collected in 2002 and initiated with only 33 females and 7 males (Wyckhuys *et al.* 2008), was not restocked with other field-collected individuals, and with a generation period of about a week under laboratory conditions. For face flies there is a negative correlation between the duration of the breeding period in laboratory and the capacity to induce diapause (Kim *et al.* 1995). Nevertheless, *B. communis* remains a suitable candidate for classical biological control of the soybean aphid in North America, but new strains have to be collected and released. Our results also advocate for a reconsideration of the procedure used for rearing potential biological control agents during quarantine and laboratory confinements prior to field releases.

Although promising under controlled environments, *A. colemani* did not show strong potential to control *A. glycines* when released in soybean fields. We estimate that from 1720 to 2011 parasitoid females had been released per test, but a total of only 113 mummies were recovered within a 60 m radius from the release point, corresponding to an overall parasitism rate of 0.73%. Nevertheless, our results do suggest that *A. colemani* females have a good dispersal capacity since several mummies were observed on sentinel plants 60 m away from the release site 48 h later. Fournier and Boivin (2000) and Bullock *et al.* (2002) showed the importance of climatic condition for dispersion of insects. The conditions observed during all our essay were suitable for the release of aphid parasitoids. Wind speed never exceeded 22 km/h (Figure 2.5) and heavy rain during the essay B fall after sentinel plants were returned at Montréal (Figure 2.6). On kohlrabi plants infested by *M. persicae*, Langholf *et al.* (2005) found that approximately 2250 *A. colemani* females produced a total of 248 mummies one day after release within a 16 m distance from the release point. Based on data collected on the third and fifth day following parasitoid release, they concluded that an unknown proportion of *A. colemani* females remained nearby the release site for several days although parasitism decreased rapidly over time. Nevertheless, they estimated that a great majority of females (89%) dispersed over large distances once released in the field, a pattern also observed for other parasitoid species (e.g. Messing *et al.* 1995, Corbett and Rosenheim 1996). Dispersal ability was an important factor to consider when choosing for inoculative biological control, because it can affect the capacity of parasitoids to persist in the field during the season. For parasitoid with a small capacity of dispersal, local pest control is possible but with high risk of inbreeding. In contrast, if the parasitoids have high dispersal

capacity they can leave the field, thereby increasing risk of mate-finding failure and Allee effects (Heimpel and Asplen 2011). Basic knowledge of aphid parasitoid dispersal and limited experimental evidence are insufficient to predict patterns of field colonisation by large numbers of females released in one site. Although preliminary, but fairly consistent with those of Langholf *et al.* (2005), our study does not suggest that mass-releases of *A. colemani* would have a strong, rapid and localised impact on *A. glycines* populations.

Another question that needs to be explored, as reported by Chacón *et al.* (2008), is whether *A. colemani* could have been a victim of intraguild predation by Coccinellidae or other generalist predators. Also, *A. certus* Yasnosh (Hymenoptera: Aphelinidae) might have entered in competition with *A. colemani*, thereby reducing its efficiency as biological control agent.

Our results question the intrinsic capacity of *A. colemani* to control soybean aphids under field conditions. However, more information is needed about factors that determine their dispersion over mid- to long distances, thereby their capacity to colonise surrounding soybean fields and be effective biological control agents. It might be that *A. colemani* are more efficient parasitoids when aphid populations are large, which was not the case in our experiments. We do not have information about the fate of the released parasitoids. Did they leave the soybean agroecosystem to

exploit other plant-host associations? Did most of them die rapidly following release? Did they enter competition with *A. certus*?

## **2.5 Acknowledgments:**

We are grateful to G. Heimpel, University of Minnesota who supplied *B. communis* and to G. Labrie, CÉROM, who provided access to the experimental plot. This study was financially supported by the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec through its PSIA programme.



### CHAPITRE 3

**Écologie saisonnière d'*Aphelinus certus* (Hymenoptera:  
Aphelinidae), parasitoïde du puceron du soya, *Aphis  
glycines* (Hemiptera: Aphididae)**

**Écologie saisonnière d'*Aphelinus certus* (Hymenoptera:  
Aphelinidae), parasitoïde du puceron du soya, *Aphis glycines*  
(Hemiptera: Aphididae)**

Gariépy, V.<sup>1</sup>, Boivin, G.<sup>2</sup>, Brodeur, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de recherche en biologie végétale, Université de Montréal, 4101 rue  
Sherbrooke est, Montréal, Québec, Canada H1X 2B2

<sup>2</sup> Centre de recherche et de développement en horticulture de agriculture et agro-  
alimentaire Canada, 430 blv Gouin, St-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canda J3B  
3E6

**Auteur correspondant**

Jacques Brodeur  
Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université de Montréal  
4101 rue Sherbrooke est  
Montréal, Québec, H1X 2B2, Canada

## Résumé

Une espèce de parasitoïde du puceron du soya, *Aphis glycines*, non répertoriée jusqu'à maintenant au Québec, a été échantillonnée à l'été 2010 dans un champ de soya de Saint-Mathieu-de-Beloeil et formellement identifiée comme étant *Aphelinus certus* (Hymenoptera: Aphelinidae). L'objectif de cette étude était d'examiner des éléments de l'écologie saisonnière de cette espèce au Québec, en évaluant la période d'entrée en diapause en automne, la survie hivernale, le point de cristallisation des individus en diapause et l'émergence au printemps. À l'automne 2010, des pucerons parasités par *A. certus* ont, à intervalles réguliers, été exposés aux conditions naturelles à l'Insectarium de Montréal. Les premières momies contenant des parasitoïdes en diapause se sont formées à partir des pucerons parasités exposés à l'extérieur le 08 septembre. La totalité des momies de la cohorte du 22 septembre contenait des prépupes en diapause. La survie hivernale a été évaluée dans trois régions du Québec : Laval, Saint-Blaise-sur-Richelieu et Québec. Pour chaque région, deux sites d'hivernement ont été testés, soit sous le couvert de neige et exposé aux intempéries (approximativement 2m au-dessus du sol). La survie hivernale est très variable selon les traitements et les régions (de 22,6 à 99,0%), les individus sous couvert de neige présentant une meilleure survie hivernale. Le point de cristallisation évalué en laboratoire est de  $-35,56 \pm 2,19^{\circ}\text{C}$ . Les parasitoïdes en diapause ont débuté leur émergence printanière le 20 mai et plus de 95% des individus étaient émergés le 01 juin. Ces résultats indiquent que *A. certus* a la capacité de survivre aux conditions hivernales qui prévalent au Québec et qu'il est déjà actif lorsque le puceron du soya colonise les champs de soya au Québec.

**Mots clés:** pucerons du soya, *Aphis glycines*, parasitoïde, *Aphelinus certus*, lutte biologique, survie hivernale, synchronisme saisonnier, point de cristallisation

### 3.1 Introduction :

Le puceron du soya, *Aphis glycines* Matsumura (Hemiptera: Aphididae), un insecte originaire de l'Asie, a été observé pour la première fois en Amérique du Nord en 2000 au Wisconsin (Alleman *et al.* 2002). Le ravageur se disperse rapidement et colonise désormais toutes les régions productrices de soya, soit 21 États Américains ainsi que trois provinces Canadiennes, dont le Québec (Venette et Ragsdale, 2004, Ragsdale *et al.* 2011). Le puceron du soya peut causer d'importantes pertes économiques en diminuant la biomasse ainsi que la qualité des grains et des plants de soya durant la saison de croissance (Ragsdale *et al.* 2007, Rhains *et al.* 2007, Beckendorf *et al.* 2008), en plus d'être un vecteur important de diverses maladies virales (Clark et Perry 2002, Burrows *et al.* 2005, Davis *et al.* 2005). Depuis 2003, une augmentation de l'utilisation des insecticides dans les champs de soya a été observée en Amérique du Nord, dans le but de diminuer les pertes économiques occasionnées par *A. glycines* (Heimpel et Shelly 2004, Ragsdale *et al.* 2011). Face à ce problème, la lutte biologique se profile comme une solution efficace, économique et durable pour le contrôle du puceron du soya en Amérique du Nord.

Des études menées en Asie ont démontré la contribution significative des ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes, entomopathogènes) pour le contrôle des populations du puceron du soya (Van Den Berg *et al.* 1997, Liu *et al.* 2004, Miao *et al.* 2007). De même, en Amérique du Nord, les prédateurs indigènes et naturalisés contribuent grandement au contrôle des populations du puceron du soya (Ragsdale *et*

*al.* 2011). Toutefois, certaines études démontrent une faible abondance de parasitoïdes de pucerons en Amérique du Nord en comparaison de celle observée en Asie (Nielsen et Hajek 2005, Kaiser *et al.* 2007, Noma et Brewer 2008). De plus, alors qu'un taux de parasitisme généralement supérieur à 10% est observé en Asie (Miao *et al.* 2007, Heimpel *et al.* 2010), moins de 1% des pucerons sont parasités en Amérique du Nord (Kaiser *et al.* 2007, Noma et Brewer 2008, voir Ragsdale *et al.* 2011). Ce faible taux de parasitisme pourrait contribuer aux explosions sporadiques des populations d'*A. glycines*. Dans ce contexte, des programmes de lutte biologique classique ont été initiés afin d'introduire en Amérique des parasitoïdes d'origine asiatique qui soient spécifiques au puceron du soya (Ragsdale *et al.* 2011). Parallèlement, lors d'échantillonnages réalisés à l'été 2010 à Saint-Mathieu-de-Beloil au Québec, nous avons observé le parasitoïde *Aphelinus certus* Yasnosh (Hymenoptera: Aphelinidae) (V. Gariépy, communication personnelle). Il s'agit d'une première mention pour le Québec. L'espèce fut formellement identifiée par le Dr. K. Hopper, USDA, Delaware.

Ce parasitoïde est retrouvé depuis 2005 dans des champs de soya des États-Unis (Brewer et Noma 2010, Heimpel *et al.* 2010) et du Canada, dans la province de l'Ontario (Frewin *et al.* 2010). *Aphelinus certus* est une guêpe parasitoïde originaire d'Asie probablement introduite accidentellement (Heraty *et al.* 2007, Heimpel *et al.* 2010). Lors d'essais préliminaires en champ de soya le parasitoïde a parasité jusqu'à 51% des pucerons du soya exposés sur des plantes sentinelles (V. Gariépy, communication personnelle). Frewin *et al.* (2010), ont démontré en laboratoire une

réponse fonctionnelle de type II chez *A. certus*. De plus, et malheureusement dans le contexte de la lutte biologique, ce parasitoïde possède une faible spécificité pour le puceron du soya (K. Hopper, communication personnelle). Toutefois, à notre connaissance, aucune information sur l'écologie saisonnière d'*A. certus* n'est disponible à l'heure actuelle.

L'objectif de cette étude est d'examiner le cycle saisonnier d'*A. certus* en automne (entrée en diapause) et au printemps (émergence printanière) en conditions naturelles ainsi que d'évaluer la survie hivernale et la résistance au froid (en laboratoire) de la population échantillonnée à Saint-Mathieu-de-Beloeil en Montérégie.

### 3.2 Matériels et méthodes :

À l'été 2010 nous avons établi un élevage avec 150 adultes d'*A. certus*, provenant d'un champ de soya de Saint-Mathieu-de-Beloeil en Montérégie au centre de recherche sur les grains (CÉROM), (45°34'46,40''N et 73°14'23,89''O) en récoltant des momies d'*A. glycines*. La colonie a été maintenue en chambre de croissance à  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  avec une photopériode de 16:8 (L:N) à 50-70% d'humidité relative (RH).

#### 3.2.1. Induction de la diapause

À l'automne 2010, la période d'entrée en diapause d'*A. certus* a été déterminée à partir du mois de septembre. Des pucerons du soya, parasités en laboratoire par *A. certus* et maintenus sur des plants de soya (*Glycine max* (L.) Merrill) dans des cages, ont été exposés aux conditions naturelles à l'Insectarium de Montréal. Une première cage a été exposée le 1<sup>er</sup> septembre et le protocole a été renouvelé chaque semaine jusqu'au 13 octobre. Lors des deux premières semaines, une seule cage a été exposée à cause d'un manque d'individus. Par la suite, cinq cages (répétitions) ont été utilisées. Les pucerons parasités ont été obtenus en exposant 175 à 250 pucerons de différents stades de développement à des femelles parasitoïdes âgées de 24-48 h (ratio de 1 parasitoïde : 5 pucerons) pour une période de 24 h dans des cages de mousseline à  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  avec une photopériode de 16:8 (L:N) 60  $\pm$  10% RH. Les cages ont ensuite été exposées aux conditions naturelles à l'Insectarium de Montréal.

Sept jours suivant leur sortie à l'extérieur, les cages ont été inspectées à tous les deux jours. Les momies ont été récoltées dès leur formation, distribuées individuellement dans des capsules de gélatine et conservées dans des boîtes de pétri déposées à côté des cages. Les émergences des parasitoïdes ont été régulièrement observées. Pour une même cohorte, quatorze jours suivant la dernière émergence, les momies restantes ont été disséquées afin d'évaluer le stade de développement du parasitoïde (Brodeur et McNeil 1994).

Le taux d'entrée en diapause a été évalué pour chaque date de sortie de pucerons parasités. Dans les cas du 1<sup>er</sup> (n=205 momies) et 08 (n=130 momies) septembre, le pourcentage d'entrée en diapause représente la moyenne pour chacune des cages. Pour les dates suivantes, le pourcentage de diapause est établi comme la moyenne de l'ensemble des cages où un minimum de 8 et un maximum de 45 momies ont été retrouvés au cours des deux dernières sorties de pucerons parasités (n=24 ± 10 momies).

Les températures minimums, moyennes et maximums utilisées à des fins d'analyse sont celles enregistrées par Environnement Canada à la station de l'Aéroport International Pierre Elliott Trudeau à 18 km de l'Insectarium de Montréal.



### 3.2.2. Survie hivernale et émergence printanière

Durant l'automne 2010 des pucerons ont été parasités par *A. certus* afin d'obtenir des momies avec des prépuces en diapause. La méthode de parasitisme est similaire à celle précédemment utilisée pour déterminer la période d'entrée en diapause à l'exception que les cages sont mises dans une chambre de croissance à  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  à une photopériode de 12:12 (L:N) à  $60 \pm 10\%$  RH, une condition qui induit 100% de diapause chez d'autres espèces de parasitoïdes de pucerons (Brodeur et McNeil 1989, Yu 1992).

Sept jours suivant leur formation, les momies ont été récoltées et soigneusement inspectées afin d'éliminer celles qui furent abîmées lors de la manipulation. Les momies ont été dénombrées et un certain nombre disséqué, pour chacune des deux cages ( $n = 44$  et  $70$  momies), afin d'évaluer le pourcentage de mortalité et de parasitoïdes non diapausant, soit respectivement 0% de mortalité dans les deux cas et 15,9 et 15,7% de parasitoïdes non diapausant. Ces pourcentages ont permis de corriger les taux de survie hivernale (en soustrayant 15,9 et 15,7% du nombre de momies totales mises à l'extérieur pour chacun des pétris respectif sorti à l'hiver 2011). Les momies restantes ont été réparties dans 12 pétris, dont 6 contenant 35 momies et 80 pour les autres pétris. Le nombre de momies réparties par échantillon diffère car nous n'avons pas mélangé les momies provenant de cages différentes. Deux pétris contenant des momies ( $n = 35$  et  $n = 80$ ) ont été mis sous couvert de neige dans chacune des trois régions suivantes : Québec ( $46^\circ44'28''\text{N}$ ,  $71^\circ21'16''\text{O}$ ), Laval ( $45^\circ34'29''\text{N}$ ;  $73^\circ49'02''\text{O}$ ) et Saint-Blaise-sur-Richelieu

(45°13'30"N, 73°15'09"O). Deux autres pétris (n = 35 et n = 80) ont été mis en hauteur (2m) de façon à ce que les momies soient exposées aux intempéries hivernales, afin de comparer le taux de survie selon le traitement et la région.

Au printemps 2011 (19 avril), les pétris de chaque région ont été rapatriés à Laval, en conditions naturelles, afin d'observer les dates d'émergence ainsi que le taux de survie. Chaque momie a été mise individuellement dans des capsules en gélatine et leur date d'émergence notée en fonction de la région de provenance ainsi que du traitement. Suivant la dernière émergence, les momies restantes ont été disséquées quatorze jours plus tard afin de déterminer à quel stade de développement le parasitoïde est mort (Brodeur et McNeil 1994).

La survie hivernale a été comparée entre régions pour chaque site au sein d'une même région ainsi qu'entre les traitements pour une même région (n = 115 par région par traitement). Les données des deux échantillons ont été mises en commun pour effectuer une analyse de chi-carré modèle log-linéaire afin de comparer, en premier lieu, la survie hivernale entre les traitements exposés à l'air et sous couvert de neige pour chaque région. En second lieu, la même analyse a été effectuée afin de comparer les régions entre elles (Laval, Saint-Blaise-sur-Richelieu, Québec) pour chaque traitement effectué.

À l'aide des dates d'émergence des parasitoïdes, l'émergence printanière cumulative ( $n = 325$  momies) de chacun des sexes a été évaluée. Les émergences ont été mises en commun, car l'ensemble des momies a été ramené au même endroit lors de l'évaluation des émergences. Les dates d'émergence ne correspondent donc pas aux différentes régions, mais uniquement à celle de Laval.

### 3.2.3. Point de cristallisation

Au cours de l'hiver 2011, nous avons déterminé la résistance au gel d'*A. certus* en diapause en évaluant son point de cristallisation. Dans le but d'obtenir des momies en diapause, des cages contenant deux plants de soya infestés avec  $500 \pm 150$  pucerons auxquels 100 femelles d'*A. certus* âgées de 24-48h, sont ajoutées pour une période de 24 h à  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  à une photopériode de 16:8 (L:N) et  $60 \pm 10\%$  RH. Les femelles retirées, les plants sont transférés à  $15 \pm 1^\circ\text{C}$  à une photopériode de 12:12 (L:N) à  $60 \pm 10\%$  RH. Les momies sont récoltées sept jours après la formation des premières momies et inspectées une à une afin de s'assurer qu'elles n'ont pas été abimées durant leur manipulation. Les momies ont été conservées aux mêmes conditions durant leur développement, jusqu'à ce que leur point de cristallisation soit déterminé, soit un mois suivant leur formation. Cette période a permis aux individus non en diapause d'émerger avant l'évaluation du point de cristallisation.

La taille des momies a d'abord été standardisée en sélectionnant des individus de poids entre 0,070 et  $0,110 \pm 0,005\text{mg}$ . La méthode utilisée pour déterminer le

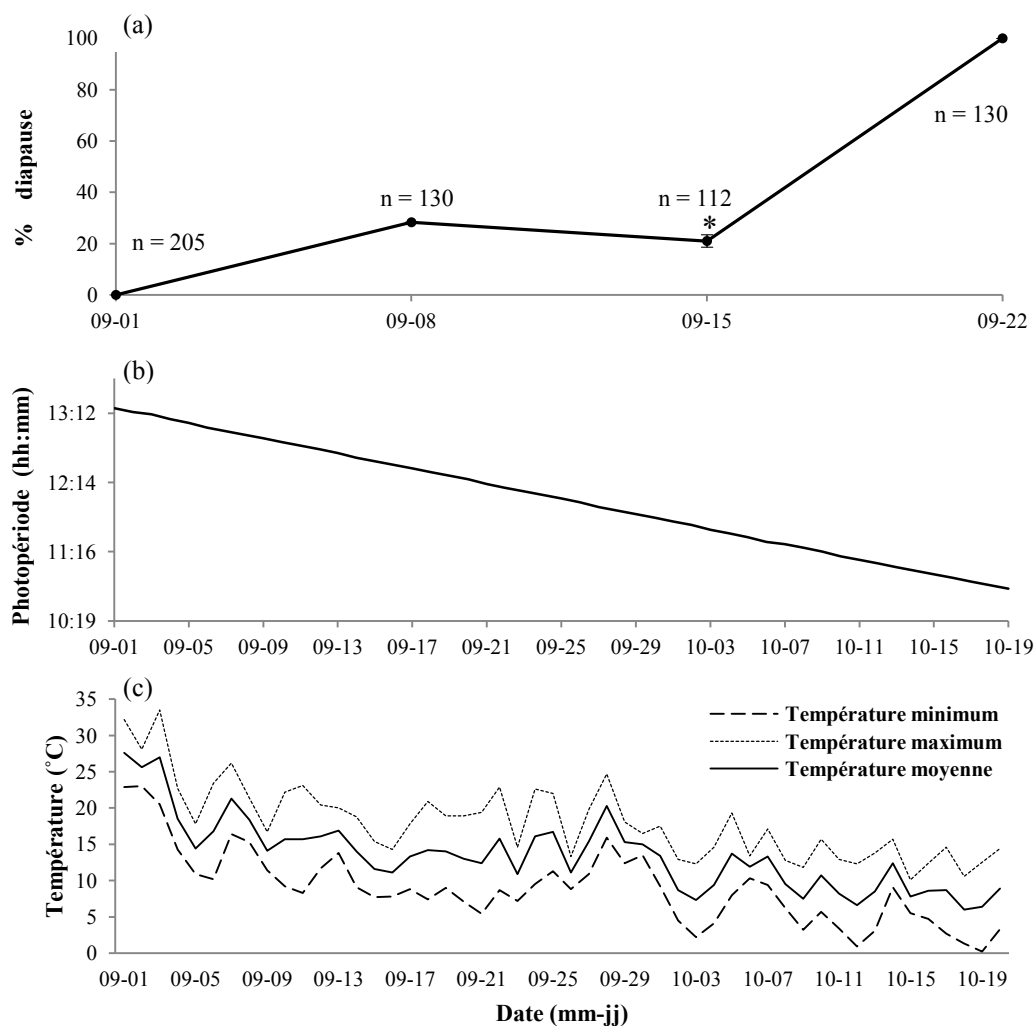
point de cristallisation est décrite par Rochefort et *al.* (2011). Chacune des momies était fixée avec du papier collant sur un thermocouple (type E, fait de Chromega<sup>TM</sup> / constantan de omega). Les thermocouples sont fixés sur une plaque de polystyrène, glissés dans une boîte de polystyrène et ensuite insérés dans un congélateur. La température diminue environ de 1,0°C/min jusqu'à l'obtention du point de cristallisation. Le point de cristallisation est la température la plus froide observée avant la formation spontanée de cristaux à l'intérieur de l'hémolymphe de l'insecte (Leather *et al.* 1993, Bale 2002). Celui-ci est atteint lorsqu'il y a un dégagement de chaleur provoqué par la formation de cristaux de glace à l'intérieur de l'hémolymphe de l'insecte. Le point de cristallisation a été déterminé pour 77 momies en diapause dont le sexe n'a pu être évalué ni avant, ni après l'obtention du point de cristallisation.

### 3.3 Résultats et discussion :

#### 3.3.1. Induction de la diapause

Aucun des parasitoïdes exposés le 1<sup>er</sup> septembre 2010 aux conditions naturelles à l'extérieur de l'Insectarium de Montréal n'est entré en diapause (Figure 3.1a). Au cours des deux semaines suivantes, respectivement 28,3% et 21,0% des *A. certus* ont initié la diapause. À compter du 22 septembre, toutes les momies contenaient des prépuces en diapause. Aucun parasitoïde n'a par la suite été observé chez les autres cohortes de pucerons parasités; la totalité des pucerons étant morts avant le 10 octobre.

La photopériode au cours de l'automne diminue progressivement, soit d'environ trois minutes par jour (Figure 3.1b). Chez *A. certus*, le pourcentage d'entrée en diapause passe de 0 à environ 30% lorsque la photopériode avoisine 13 heures de lumière avec une température moyenne de 18,1°C (Figure 3.1c). Ce pourcentage atteint 100% pour une photopériode de 12 heures et 10 minutes et une température moyenne de 15,8°C. Des résultats similaires ont été observés au Québec chez *Aphidius nigripes* Ashmead (Hymenoptera: Aphidiidae), un parasitoïde du puceron de la pomme de terre (Brodeur et McNeil 1989).



**Figure 3.1** (a) Le pourcentage moyen de prépuces d'*Aphelinus certus* en diapause en fonction de la date d'exposition aux conditions naturelles à l'Insectarium de Montréal à l'automne 2010. (b) Le nombre d'heures de lumière du 01 septembre au 19 octobre 2010 (Environnement Canada 2011). (c) Les températures minimums, moyennes et maximums enregistrées à l'Aéroport International Pierre Elliott Trudeau du 01 septembre au 19 octobre 2010 (Environnement Canada 2011).

\*Seul le pourcentage du 15 septembre est suivi d'une valeur d'écart type. Une seule répétition les 1<sup>er</sup> et 8 septembre, alors que tous les répliquats du 22 septembre avaient un taux d'entrée en diapause de 100%.

Ces résultats indiquent que la population d'*A. certus* observée en Montérégie a la capacité d'entrer en diapause sous les conditions climatiques du Québec. La diapause initiée par des changements dans l'environnement telles la photopériode et

la température (Leather *et al.* 1993), confère un état physiologique indispensable pour la survie aux longues périodes hivernales, en réduisant le métabolisme et modifiant les composants intracellulaires et de l'hémolymphe des insectes (Tauber *et al.* 1984, Zachariassen 1985). L'une des modifications du métabolisme observée avant l'entrée en diapause est l'accumulation de lipides qui servent de réserves énergétiques tout au long de la période d'hivernation (Tauber *et al.* 1984). Les modifications physiologiques se produisent au niveau intracellulaire et dans l'hémolymphe des insectes. Selon leur stratégie de survie hivernale (évitant ou résistant à la cristallisation), un mécanisme physiologique est enclenché lors de l'initiation de la diapause, permettant ainsi aux insectes de diminuer ou d'augmenter leur point de cristallisation (Zachariassen 1985, Leather *et al.* 1993). Cet ensemble de stratégies augmente les chances de survie des individus au cours de la période hivernale.

De plus, nos observations suggèrent que *A. certus* a le potentiel de demeurer actif dans les champs de soya en fin de saison (août) lorsque les infestations du puceron du soya au Québec sont parfois à leur plus fort niveau (Rhainds *et al.* 2008, Parent 2011).

### 3.3.2. Survie hivernale et émergence printanière

À l'hiver 2011, la survie hivernale était variable entre chaque traitement pour chacune des régions. La survie hivernale est significativement supérieure pour les

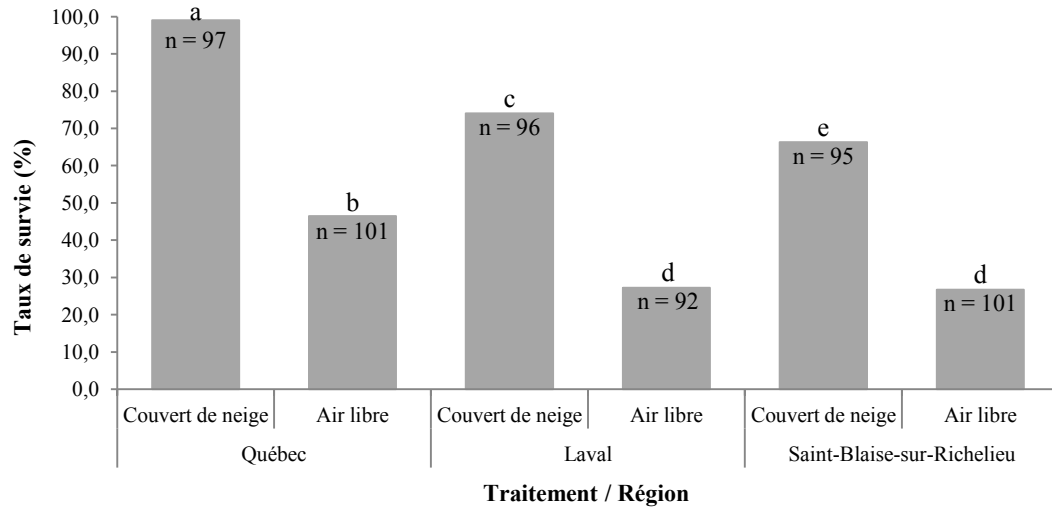
parasitoïdes ayant hivernés sous couvert de neige, celle-ci étant plus du double que celle observée chez les prépuces exposées à l'air libre (Figure 3.2; ddl=1,  $\chi^2$  de 41,553 pour Laval, de 31,126 pour Saint-Blaise-sur-Richelieu et de 83,304 pour Québec;  $P < 0,0001$ ). Manifestement, la neige a joué un rôle de protection thermique et protégé les parasitoïdes contre les températures extrêmes. Dans les régions tempérées, une couverture de neige d'au moins 25 cm contribue à maintenir la température au sol à un minimum de  $-2^{\circ}\text{C}$  (Goodrich 1982). À l'exception de la survie hivernale observée sous couvert de neige à Québec pour *A. certus* (99,0%), la survie est inférieure à celle obtenue pour le parasitoïde *A. nigripes* évaluée à  $\geq 87\%$  par Brodeur et McNeil (1994).

L'analyse chi-carré modèle log-linéaire démontre qu'il y a un effet significatif des régions selon les deux traitements. Dans le cas du traitement sous couvert de neige, on observe une différence significative entre les régions (ddl=2,  $\chi^2 = 47,223$ ,  $P < 0,0001$ ; Figure 3.2), où la survie hivernale est supérieure dans la région de Québec, suivie respectivement de Laval et de Saint-Blaise-sur-Richelieu. Une différence significative entre les régions a également été observée pour le traitement où les momies étaient exposées à l'air libre (ddl=2,  $\chi^2 = 11,000$ ,  $P = 0,0041$ ) avec une survie hivernale supérieure pour la région de Québec par rapport aux deux autres régions, lesquelles présentent une survie hivernale similaire (Figure 3.2).



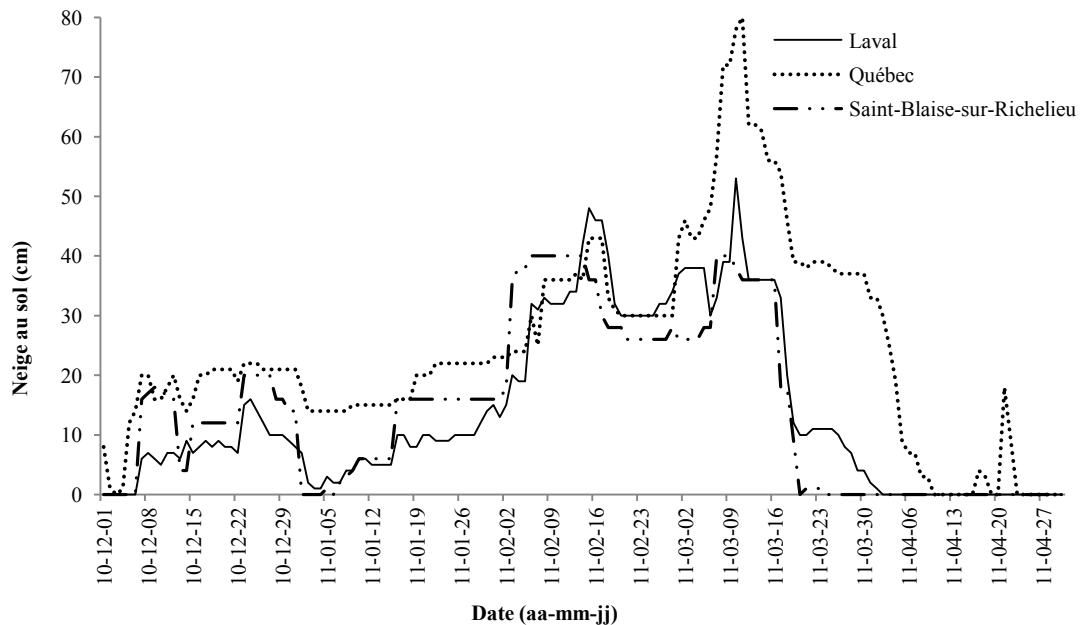
Ces résultats démontrent la capacité de la population à l'étude d'*A. certus* à survivre aux rigueurs de l'hiver québécois. Toutefois, les pourcentages de survie sont très variables selon les régions et les sites d'hivernement. Nos données indiquent qu'un couvert de neige procure une meilleure survie aux parasitoïdes. Lamb *et al.* (1985), avaient également démontré qu'avec couvert de neige la survie des pupes de *Mamestra configurata* Walker (Lepidoptera: Noctuidae) était de 55% alors qu'en absence de neige celle-ci était nulle.

Les températures dans la région de Québec sont généralement plus froides que dans les deux autres régions. Toutefois, les fluctuations de températures sont moins fréquentes dans celle-ci que les deux autres régions, diminuant les risques de gel et de dégel au cours de l'hiver. De plus, la couverture de neige dans la région de Québec débute plus tôt et perdure plus longtemps au printemps que dans les autres régions. À l'hiver 2011, la neige fut présente tout au long de l'hiver, soit jusqu'à la mi-avril dans la région de Québec, alors que pour les régions de Laval et de Saint-Blaise-sur-Richelieu la neige avait fondu au cours de la dernière semaine du mois de mars (Figure 3.3), une période de l'année où des températures minimums entre -5 et -10°C sont encore observées. Les momies furent ainsi à découvert au printemps, exposées à des températures sous 0°C. Ces fluctuations de température et de couvert de neige pourraient contribuer à expliquer la divergence entre la survie hivernale des différentes régions pour les parasitoïdes ayant hiverné sous couvert de neige. Des températures plus constantes semblent favoriser la survie hivernale des pré-pupes exposées à l'air libre.



**Figure 3.2 :** Taux de survie d'*Aphelinus certus* ayant subi le traitement sous couvert de neige ou à l'air libre à l'hiver 2011 dans les régions de Québec, Laval et Saint-Blaise-sur-Richelieu.

Les différentes lettres indiquent la présence de différence significative entre les taux de survie observés (analyse chi-carré modèle log-linéaire).



**Figure 3.3 :** La couverture de neige au sol enregistrée au cours du mois de décembre 2010 et de janvier à avril 2011 à trois stations situées à proximité des régions choisies pour l'emplacement des momies durant la période hivernale.

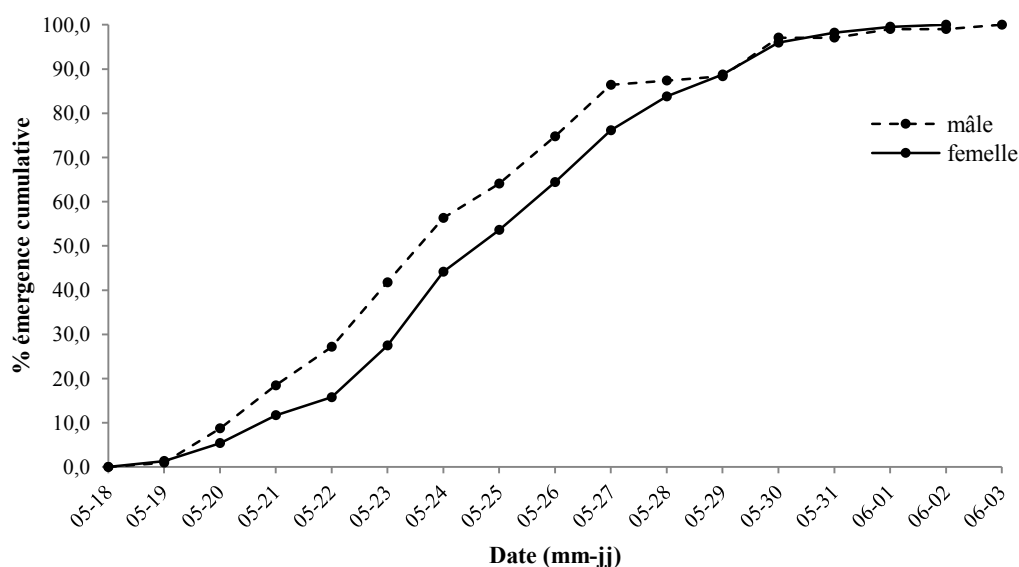
Les valeurs proviennent des stations de Sainte-Geneviève (à 8,7km de Laval), de l'aéroport International Jean Lesage (à 7,1km de Québec) et d'Iberville à 12,0km de Saint-Blaise-sur-Richelieu) (Environnement Canada 2011).

La dissection des momies restantes à la fin du printemps 2011, nous indique entre autres qu'il y a une différence significative entre le nombre d'individus morts au stade prépupe entre les deux traitements pour la région de Laval et Saint-Blaise-sur-Richelieu (analyse chi-carré modèle log-linéaire, ddl = 2; pour Laval:  $\chi^2 = 15,821$ ,  $p = 0,0004$  et pour Saint-Blaise-sur-Richelieu:  $\chi^2 = 39,259$ ,  $p < 0,0001$ ), mais non pour la région de Québec (Tableau VI). Ceci suggère que les périodes de gel/dégel jouent un rôle pour la survie des parasitoïdes qui n'étaient pas sous couvert de neige. Dans le cas des parasitoïdes morts au stade prépupe, il est possible qu'il s'agisse d'individus non-diapausant présents dans les pétris lors de leur sortie ou d'*A. certus* morts tôt au printemps durant les périodes de gel et dégel.

**Tableau VI:** Pourcentage de momies disséquées ayant un individu d'*A. certus* au stade prépupe, pupe ou adulte au printemps 2011 selon la région et le traitement subi.

Région	Traitement	n	% Prépupe	% Pupa	% Adulte
Québec	Couvert de neige	20	45,0	15,0	40,0
	Air libre	73	35,6	23,3	41,1
Laval	Couvert de neige	44	27,3	34,1	38,6
	Air libre	85	63,5	15,3	21,2
St-Blaise-de-Richelieu	Couvert de neige	50	42,0	38,0	20,0
	Air libre	92	90,2	4,4	5,4

Les parasitoïdes ont débuté leur émergence printanière le 19 mai 2011 (Figure 3.4). Six jours plus tard, plus de 50% des individus avaient émergé, un pourcentage qui atteint 95% avant le 1<sup>er</sup> juin. Les dates d'émergence de ce parasitoïde débutent un peu plus tard en mai qu'*A. nigripes*, toutefois comme dans le cas d'*A. certus*, 100% ont émergé le 3 juin. Nous observons également que comme chez *A. nigripes*, les mâles d'*A. certus* émergent un peu plus tôt que les femelles (protandrie), comme démontré chez d'autres espèces de parasitoïdes (Brodeur et McNeil 1994, He *et al.* 2004).



**Figure 3.4:** Émergence cumulative au printemps 2011 des mâles (n=103) et femelles (n=222) *Aphelinus certus* ayant passé l'hiver en condition naturelle.

En comparaison avec *A. nigripes*, la survie hivernale est relativement faible. Il est possible qu'*A. certus* ne soit pas encore très bien adapté aux conditions hivernales du Québec, principalement dans les régions où l'on observe davantage de fluctuations climatiques au cours de la saison où il est même possible d'observer une

alternance entre le gel et dégel. Ceci aurait pour effet de provoquer des blessures intracellulaires, qui peuvent s'accumuler durant la période hivernale et augmenter la mortalité hivernale (Danks 1978).

Au Québec, les premiers pucerons de soya sont généralement observés en champ au début du mois de juin-juillet selon les années (Parent 2006). Malgré leur faible densité à cette période, il s'agit d'un moment décisif pour le contrôle du puceron. Nous ignorons, à l'heure actuelle, à quel moment le parasitoïde arrive en champ de soya. Huang *et al.* (2008) ainsi que Feng *et al.* (2007) ont démontré que les parasitoïdes peuvent se disperser via des hôtes ailés parasités. Le puceron du soya, ayant une très bonne aptitude de vol et étant capable de se disperser sur de longue distance (Zhang *et al.* 2008), pourrait servir de moyen de transport pour *A. certus* en Amérique du Nord (Frewin *et al.* 2010), vu la rapide expansion de celui-ci malgré la faible capacité de vol des espèces d'*Aphelinus* spp. (Viggiani 1984). De ce fait, il est possible d'envisager, qu'au printemps, des femelles d'*A. glycines* ailées parasitées par *A. certus* migrent de leur site d'hivernage vers les champs de soya et permettent ainsi la colonisation du parasitoïde, suggérant donc qu'*A. certus* hiverne également sur le nerprun. Toutefois, *A. certus* étant un parasitoïde polyphage (K. Hopper, communication personnelle), la relation en conditions naturelles entre ce parasitoïde et cet hôte reste à confirmer, puisqu'il est probable que celui-ci hiverne sur diverses espèces.

### 3.3.3. Point de cristallisation

La résistance au froid est la capacité d'un organisme à survivre à de très basses températures. Cette résistance peut varier entre individus d'une même espèce en plus des variances existantes entre les espèces (Bale 1991). La température où il y a formation de cristaux chez les insectes nous permet de déterminer si l'espèce adopte une stratégie prévoyant la cristallisation ou une stratégie tolérant la cristallisation. Dans le cas d'une stratégie prévoyant la formation de cristaux, l'insecte diminue la température de cristallisation en réduisant les concentrations d'agents cristallisants et en augmentant celles des sucres, et polyols et il synthétise quelques protéines anti-cristaux (Zachariassen 1985). Les concentrations de ces divers éléments peuvent varier au cours de la saison hivernale, par conséquent une variation du point de cristallisation peut être observée durant cette période (Zachariassen 1985). Cette valeur ne rend pas compte des blessures que peuvent provoquer de froides températures lors de longues périodes d'exposition, des blessures qui peuvent mener à la mort des individus avant même d'atteindre leur point de cristallisation (Danks 1978). Ceci en fait donc davantage une valeur théorique sur la limite létale de température minimum que peut tolérer un insecte en nous informant sur les chances de survie des individus durant la saison hivernale (Bale 2002).

La température létale observée chez certaines espèces en Amérique du Nord se retrouve sous les  $-40^{\circ}\text{C}$  (Bale et Hayward 2010). Plus particulièrement, Somme (1982) a compilé les points de cristallisation obtenus depuis les dernières décennies,

incluant des individus échantillonnés dans diverses provinces du Canada où plusieurs espèces possèdent un point de cristallisation inférieur à  $-30^{\circ}\text{C}$ . Le point de cristallisation évalué pour les prépuces d'*A. certus* en diapause est de  $-35,56 \pm 2,89^{\circ}\text{C}$  ( $n = 77$ ). La valeur la plus élevée était de  $-31,37^{\circ}\text{C}$  alors que la plus faible était de  $-39,93^{\circ}\text{C}$ . Nowierski et Fitzgerald (2002) ont également déterminé des points de cristallisation pour trois espèces de parasitoïdes de pucerons (*Aphelinus albipodus* Hayat et Fatima (Hymenoptera: Aphelinidae), *Aphelinus asychis* Walker (Hymenoptera: Aphelinidae), *Diaeretiella rapae* McIntosh (Hymenoptera: Braconidae)) originaires de différentes régions (Montana, Grèce et Caucase). Les valeurs obtenues étaient inférieures à  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Les températures au cours de l'hiver au Québec peuvent descendre sous les  $-40^{\circ}\text{C}$  (Environnement Canada, 2011). Toutefois, les minimums quotidiens durant l'hiver ne dépassent que rarement le  $-15^{\circ}\text{C}$ , ce qui nous indique qu'*A. certus* a la capacité de survivre aux températures hivernales du Québec. Le point de cristallisation moyen d'*A. certus* étant de  $-35,56^{\circ}\text{C}$ , il est probable que celui-ci hiverne exposé à l'air libre au stade prépupe.

La présence de momies d'*A. certus* au Québec à l'été 2010 sur des plants de soya dans la première semaine de juillet à Saint-Mathieu-de-Beloeil, suggère que celui-ci est possiblement en champ dès le mois de juin. Notre étude nous indique que le parasitoïde est actif à partir de la mi-mai jusqu'à la mi et fin septembre. De ce fait,

le parasitoïde serait actif tôt en saison jusqu'à ce que le puceron du soya quitte les champs de soya pour migrer à leur site d'hivernement, le nerprun (Voegtlin *et al.* 2004, Voegtlin *et al.* 2005). Avec un point de cristallisation de  $-35,56^{\circ}\text{C}$  ce parasitoïde a démontré sa capacité à survivre aux hivers québécois, avec une survie hivernale supérieure sous couvert de neige.

À la lumière de ces faits, une lutte biologique par aménagement avec cette espèce de parasitoïde au Québec semble être une possibilité intéressante. *Aphelinus certus* permettrait de seconder les ennemis naturels déjà présents dans les champs de soya du Québec et diminuerait d'autant les risques d'infestation d'*A. glycines* au-dessus du seuil économique. Pour ce faire, la création de zones refuges à proximité des champs composés de diverses espèces de plantes nectarifères procurerait une source alimentaire pour les adultes, qui se nourrissent de substances sucrées tel le nectar (Viggiani 1984). L'utilisation des pesticides doit être restreinte au minimum et lorsque nécessaire, le choix de pesticides à faible spectre d'action est essentiel afin de diminuer les risques d'affecter les ennemis naturels, limitant ainsi les risques d'un retour rapide d'importantes densités du puceron suite à la dégradation des pesticides dans l'environnement. Dans le cas d'*A. certus*, Frewin *et al.* (2011) ont déjà évalué la concentration létale de pesticides actuellement épandus dans les champs de soya du Canada et fait certaines recommandations sur les pesticides à éviter. Des variétés de soya résistantes au puceron du soya sont une alternative intéressante aux pesticides, certaines variétés ont d'ailleurs fait l'objet d'études aux États-Unis (Li *et al.* 2004).



Malgré toutes les informations connues jusqu'à maintenant sur la biologie d'*A. certus*, davantage d'informations sur sa distribution géographique au Québec et sa biologie, principalement sur la dynamique existante entre ce parasitoïde et le puceron du soya sur son hôte primaire et secondaire sont nécessaires afin d'optimiser le potentiel de cet agent de contrôle via une lutte biologique par aménagement.

### **3.4 Remerciements :**

Je remercie Keith Hopper du USDA au Delaware qui a identifié *A. certus*, ainsi que Éric Bauce et Martin Charest de l'Université Laval pour m'avoir permis de réaliser les tests de point de cristallisation du parasitoïde. Je remercie également le MAPAQ et son Programme PSIA pour les ressources financières.

## Conclusion générale

Au cours de notre étude, *A. certus* est le parasitoïde ayant démontré le meilleur potentiel comme agent de lutte pour le puceron du soya au Québec. Nos résultats suggèrent qu'il est actif au cours de la période critique où le puceron du soya a la capacité d'augmenter rapidement en densité et de provoquer des dommages économiques importants. De plus, les résultats sur la résistance au froid de ce parasitoïde nous permettent de confirmer qu'il survit aux hivers québécois. Étant formellement identifié et répertorié au Québec dans la région de la Montérégie, une lutte par aménagement semble être, à l'heure actuelle, l'une des meilleures options dans le cadre d'un programme de lutte intégrée contre le puceron du soya. Cette lutte pourrait prendre forme à l'aide de zones refuges à proximité des champs, en plantant des plantes nectarifères. De plus, limiter l'utilisation des pesticides au cours de la saison favoriserait la présence du parasitoïde. Toutefois, si l'utilisation de pesticides s'avère primordiale, le choix du pesticide à faible spectre d'action doit être favorisé afin de limiter la perte d'ennemis naturels du puceron du soya. Cependant, l'acquisition d'informations supplémentaires sur sa distribution actuelle au Québec et son abondance serait un atout pour effectuer une lutte biologique par aménagement dans les diverses régions productrices de soya. Étant une espèce originaire d'Asie ainsi qu'un parasitoïde non spécifique au puceron du soya, la dynamique réelle qu'il développe dans les champs de soya du Québec avec les diverses espèces de pucerons reste à démontrer en conditions naturelles. Étant une espèce polyphage, davantage d'information sur les interactions potentielles de prédation intraguilde et de compétition interspécifique s'avère nécessaire. Afin d'optimiser une lutte de ce type,

des renseignements sur leurs sites d'hivernage et leur mode de dispersion sont primordiaux.

La souche de *B. communis* échantillonnée en Asie, importée aux États-Unis et mise en quarantaine dans le but d'effectuer divers essais en laboratoire afin de vérifier son potentiel contre le puceron du soya, a démontré sa capacité à parasiter spécifiquement *A. glycines*. Toutefois, notre étude démontre qu'elle est désormais incapable d'entrer en diapause, possiblement dû à une sélection artificielle via les conditions de l'élevage. De ce fait, malgré sa spécificité pour le puceron du soya, son utilisation dans un programme de lutte biologique classique durable par son établissement à long terme devient impossible dans les conditions climatiques du Québec. Il est tout de même possible d'envisager qu'une autre souche de *B. communis*, nouvellement importée du Nord de la Chine, puisse entrer en diapause dans les conditions climatique du Québec. De nouvelles expérimentations seraient alors nécessaires afin de discriminer formellement ce parasitoïde dans le cadre d'une lutte biologique classique en Amérique du Nord.

Les expérimentations effectuées dans le cadre de ce projet nous ont permis de mettre en évidence les possibles effets à long terme des élevages en laboratoire dans des conditions optimales continues. Cette observation est un élément important dont il faudra tenir compte lors des prochaines mises en quarantaine d'espèces importées dans le cadre de divers projets de lutte biologique. La perte de certains caractères

importants, dont la capacité d'entrer en diapause, peut diminuer grandement le potentiel intrinsèque d'un agent de lutte biologique. Ceci a pour effet de diminuer la plasticité génétique des individus et ainsi réduire leur intérêt dans ce type de programme en affectant leur fitness et leur probabilité d'établissement. Afin de réduire ces risques deux choix sont envisageables, d'abord les conditions d'élevages ne doivent pas être idéales en tout temps, mais plutôt générer certaines fluctuations comme celles présentes lors des changements saisonniers. En second lieu, l'ajout d'individus nouvellement récoltés devrait être fait dans l'élevage afin de maintenir la variabilité phénotypique dans les élevages.

Étant déjà disponible sur le marché comme agent de lutte dans les serres, *A. colemani* aurait pu être un agent de contrôle à faible coût et facile d'accès pour les agriculteurs dans le cadre d'une lutte inoculative. Cependant, nos résultats ont démontré qu'il est inefficace en champ contre le puceron du soya, malgré sa capacité à parasiter celui-ci en lieux clos. Ce parasitoïde semble se disperser rapidement hors du champ de soya, possiblement dû à sa faible spécificité pour le puceron du soya. Il s'avère donc que cette espèce n'ait actuellement aucun avenir dans le contrôle du puceron du soya dans le cadre d'un programme de lutte inoculative. Toutefois, ce parasitoïde est naturellement absent dans nos régions, ce qui n'est pas le cas aux États-Unis où de faibles populations de ce parasitoïde ont déjà été observées dans les champs de soya. Des lâchers d'*A. colemani* pourraient être effectués afin de vérifier si son utilisation dans le cadre d'une lutte augmentative ou inondative serait avantageuse dans ces régions. Il pourrait être intéressant de vérifier si l'ajout

d'individu pourrait avoir un effet additif sur le taux de parasitisme déjà présent dans les champs de soya dans ces régions.

Les informations recueillies jusqu'à maintenant, tant sur la biologie du puceron du soya en Amérique du Nord que sur la guildes d'ennemis naturels présente dans les champs de soya, nous indiquent qu'une certaine dynamique entre ces aphidiphages et leur proie s'est naturellement installée au fil du temps. Toutefois, le puceron du soya inquiète toujours les agronomes et les agriculteurs, car malgré la présence d'importants prédateurs, des infestations sérieuses ont été observées à quelques reprises au cours des dernières années, nécessitant l'utilisation de pesticides. Les parasitoïdes étant des espèces plus spécifiques envers leur hôte et capables de repérer de faibles densités de celui-ci, deviennent des atouts majeurs pour le contrôle d'un ravageur. *Aphelinus certus*, pourrait être une solution prometteuse, mais des études complémentaires sur la dynamique que celui-ci occupe dans la chaîne trophique du puceron du soya (intraspécifique et interspécifique) doivent être effectuées avant de lancer un programme de lutte par aménagement, puisque son véritable impact sur les densités du puceron reste à être défini. De plus, la possibilité d'utiliser des plants de soya résistants aux pucerons du soya est également envisagée. De ce fait, que ce soit par l'ajout de parasitoïdes ou l'utilisation de différentes variétés de soya, le but est de mettre sur pied une lutte intégrée contre *A. glycines*. Ceci permettrait de diminuer l'épandage de pesticides et ainsi de réduire les risques d'observer le développement de résistance chez les populations de ce ravageur, tout en conservant les densités de populations du puceron du soya sous le

seuil économique. La réduction d'épandage de pesticides diminue non seulement les coûts pour les agriculteurs, mais également les dommages pour l'environnement et la santé humaine qu'ils provoquent. Les méthodes de cultures à grandes surfaces effectuées depuis plusieurs décennies dans plusieurs régions du monde, sont des sources de diverses pollutions environnementales. Il est donc primordial de modifier certains aspects de cette culture et de proposer des alternatives, dont la lutte biologique. Ces alternatives permettraient une exploitation davantage durable et respectueuse de notre environnement pour les années futures et ainsi diminuer l'apport des plans d'eau et des terres agricoles en contaminants.

## Bibliographie

- Alleman RJ, Grau CR, et Hogg DB. (2002)** Soybean aphid host range and virus transmission efficiency. Proceedings of the Wisconsin Fertilizer, Agrilime and Pest Management Conference [En ligne] [www.soils.wisc.edu/extension/FAPM/2002proceedings/Alleman-Conf-2002.pdf](http://www.soils.wisc.edu/extension/FAPM/2002proceedings/Alleman-Conf-2002.pdf). Consulté le 10 mai 2010.
- Arcier F, Millot P, Belzunces LP. (2001)** Inoculative releases of *Anthocoris nemoralis* F. in pear orchards. Phytoma: La Défense des Végétaux (France) **544**: 76-78.
- Asplen MK, Wyckhuys KAG, et Heimpel GE. (2011)** Parasitism of autumnal morphs of the soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) by *Binodoxys communis* (Hymenoptera: Braconidae) on buckthorn. Annals of the Entomological Society of America **104**: 935-944.
- Bale J. (1991)** Insects at low temperature: a predictable relationship? Functional Ecology **5**: 291-298.
- Bale J. (2002)** Insects and low temperatures: from molecular biology to distributions and abundance. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences **357**: 849-862.
- Bale J, et Hayward S. (2010)** Insect overwintering in a changing climate. Journal of Experimental Biology **213**: 980-994.
- Beckendorf EA, Catangui MA, et Riedell WE. (2008)** Soybean aphid feeding injury and soybean yield, yield components, and seed composition. Agronomy Journal **100**: 237-242.
- Berlan J-P, Bertrand J-P, et Lebas L. (1976)** Éléments sur le développement du «complexe soja» américain dans le monde. Tiers-Monde **17**: 307-330.
- Biobest Biological Systems. (2010)** Fiche technique: d'*Aphidius colemani*. [En ligne] [www.biobest.ca](http://www.biobest.ca). Consulté le 07 avril 2010.
- Blackman RL, et Eastop VF. (2000)** Aphids on the world's crops: an identification and information guide, 2nd edition. John Wiley, Chichester. 476 p.



- Breault J, Duval B, Filion P, Martel H, Meloche F, Parent C, Rondeau A, et Roy M. (2007)** Stratégie d'intervention au Québec en 2007 contre le puceron du soya. Bulletin du RAP-Grande Culture No 07, 12 juin 2007 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 05 avril 2011.
- Breault J, Duval B, Filion P, Labrie G, Meloche F, Parent C, Rondeau A, et Roy M. (2009)** Stratégie d'intervention recommandée au Québec contre le puceron du soya en 2009. Bulletin du RAP-Grande Culture No 18, 10 juillet 2009 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 05 avril 2011.
- Brewer MJ, et Noma T. (2010)** Habitat affinity of resident natural enemies of the invasive *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae), on soybean, with comments on biological control. *Journal of Economic Entomology* 103: 583-596.
- Brodeur J, et McNeil JN. (1989)** Biotic and abiotic factors involved in diapause induction of the parasitoid, *Aphidius nigripes* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Journal of Insect Physiology* 35: 969-974.
- Brodeur J, et McNeil JN. (1994)** Seasonal ecology of *Aphidius nigripes* (Hymenoptera: Aphidiidae), a parasitoid of *Macrosiphum euphorbiae* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology* 23: 292-298.
- Brodeur J. (2009)** Gestion intégrée des insectes ravageurs des grandes cultures au Québec: une stratégie pour préserver la qualité de l'environnement et la compétitivité du secteur. [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca>. Consulté le 10 mai 2010.
- Bullock JM, Kenward RE, et Hails RS. (2002)** Dispersal ecology, 42nd Symposium of The British Ecological Society: Cambridge University Press. 480p.
- Burd J, Shufran K, Elliott N, French B, et Prokrym D. (2001)** Recovery of imported hymenopterous parasitoids released to control Russian wheat aphids in Colorado. *Southwestern Entomologist* 26: 23-32.
- Burrows MEL, Boerboom CM, Gaska JM, et Grau CR. (2005)** The relationship between *Aphis glycines* and soybean mosaic virus incidence in different pest management systems. *Plant Disease* 89: 926-934.
- Chacón J, Landis D, et Heimpel G. (2008)** Potential for biotic interference of a classical biological control agent of the soybean aphid. *Biological Control* 46: 216-225.

- Clark AJ, et Perry KL. (2002)** Transmissibility of field isolates of soybean viruses by *Aphis glycines*. *Plant Disease* **86**: 1219-1222.
- Corbett A, et Rosenheim JA. (1996)** Impact of a natural enemy overwintering refuge and its interaction with the surrounding landscape. *Ecological Entomology* **21**: 155-164.
- Costamagna AC, et Landis DA. (2006)** Predators exert top-down control of soybean aphid across a gradient of agricultural management systems. *Ecological Applications* **16**: 1619-1628.
- Costamagna AC, et Landis DA. (2007)** Quantifying predation on soybean aphid through direct field observations. *Biological Control* **42**: 16-24.
- Costamagna AC, Landis DA, et Difonzo CD. (2007)** Suppression of soybean aphid by generalist predators results in a trophic cascade in soybeans. *Ecological Applications* **17**: 441-451.
- Costamagna AC, Landis DA, et Brewer MJ. (2008)** The role of natural enemy guilds in *Aphis glycines* suppression. *Biological Control* **45**: 368-379.
- Danks H. (1978)** Modes of seasonal adaptation in the insects: I. Winter survival. *The Canadian Entomologist* **110**: 1167-1205.
- Davis JA, Radcliffe EB, et Ragsdale DW. (2005)** Soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura, a new vector of Potato virus Y in potato. *American Journal of Potato Research* **82**: 197-201.
- Davis JA, et Radcliffe EB. (2008)** The importance of an invasive aphid species in vectoring a persistently transmitted potato virus: *Aphis glycines* is a vector of potato leafroll virus. *Plant Disease* **92**: 1515-1523.
- Debach P, et Rosen D. (1991)** *Biological control by natural enemies*: Cambridge University Press. 440p.
- Desneux N, O'Neil RJ, et Yoo HJS. (2006)** Suppression of population growth of the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura, by predators: the identification of a key predator and the effects of prey dispersion, predator abundance, and temperature. *Environmental Entomology* **35**: 1342-1349.

- Desneux N, Barta RJ, Hoelmer KA, Hopper KR, et Heimpel GE. (2009)** Multifaceted determinants of host specificity in an aphid parasitoid. *Oecologia* **160**: 387–398.
- DiFonzo C, et Hines R. (2002)** Soybean aphid in Michigan: update from the 2001 season: MSU **Extension Bulletin E-2748**. Michigan State University, East Lansing, MI [En ligne] [www.ipm.msu.edu](http://www.ipm.msu.edu). Consulté le 10 mai 2010.
- Donaldson JR, Myers SW, et Gratton C. (2007)** Density-dependent responses of soybean aphid (*Aphis glycines* Matsumura) populations to generalist predators in mid to late season soybean fields. *Biological Control* **43**: 111-118.
- Dorff E. (2007)** Le soya, la culture « bonne à tout faire » de l'agriculture, gagne du terrain dans tout le Canada. Statistique Canada: **no 96-325-XIF2007000**.
- Eilenberg J, Enkegaard A, Vestergaard S, et Jensen B. (2000)** Biocontrol of pests on plant crops in Denmark: present status and future potential. *Biocontrol Science and Technology* **10**: 703-716.
- Elliott N, Burd J, Armstrong J, Walker C, Reed D, et Peairs F. (1995)** Release and recovery of imported parasitoids of the Russian wheat aphid in eastern Colorado. *Southwestern Entomologist* **20**: 125-129.
- Environnement Canada (2010)** Archives nationales d'information et de données climatologiques : Normales climatiques au Canada 1971-2000. [En ligne] [http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate\\_normals](http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals). Consulté le 10 mai 2010.
- Environnement Canada (2011)** Archives nationales d'information et de données climatologiques : Recherche spécifique en ligne de données climatiques canadiennes. [En ligne] [http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData\\_f.html](http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html). Consulté le 06 août 2011.
- Fang H, Nee H, et Chou T. (1985)** Comparative ability of seventeen aphid species to transmit tobacco vein-banding mosaic virus. *Bulletin Taiwan Tobacco Research Institute* **22**: 41-46.
- Feng MG, Chen C, Shang SW, Ying SH, Shen ZC, et Chen XX. (2007)** Aphid dispersal flight disseminates fungal pathogens and parasitoids as natural control agents of aphids. *Ecological Entomology* **32**: 97-104.

- Fournier F, et Boivin G. (2000)** Comparative dispersal of *Trichogramma evanescens* and *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) in relation to environmental conditions. *Environmental Entomology* **29**: 55-63.
- Fox TB, Landis DA, Cardoso FF, et Difonzo CD. (2004)** Predators suppress *Aphis glycines* Matsumura population growth in soybean. *Environmental Entomology* **33**: 608-618.
- Fox TB, Landis DA, Cardoso FF, et Difonzo CD. (2005)** Impact of predation on establishment of the soybean aphid, *Aphis glycines* in soybean, *Glycine max.* *BioControl* **50**: 545-563.
- Freeman DB. (1992)** Prickly pear menace in eastern Australia 1880-1940. *Geographical Review* **82**: 413-429.
- Frewin AJ, Xue Y, Welsman JA, Broadbent BA, Schaafsma AW, et Hallett RH. (2010)** Development and parasitism by *Aphelinus certus* (Hymenoptera: Aphelinidae), a parasitoid of *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae). *Environmental Entomology* **39**: 1570-1578.
- Frewin AJ, Schaafsma AW, et Hallett RH. (2011)** Susceptibility of *Aphelinus certus* to foliar applied insecticides currently or potentially registered for soybean aphid control. *Pest Management Science* [En ligne] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.2245/pdf>. Consulté le 28 juillet 2011.
- Goodrich L. (1982)** The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal* **19**: 421-432.
- Gurr G et Wratten S. (2000)** *Biological control: measures of success*. Kluwer Academic Publishers. 448p.
- Halbert S, Irwin ME, et Goodman RM. (1981)** Alate aphid (Homoptera: Aphididae) species and their relative importance as field vectors of soybean mosaic virus. *Annals of Applied Biology* **97**: 1-9.
- Hartman GL, Domier LL, Wax LM, Helm CG, Onstad DW, Shaw JT, Solter LF, Voegtlin DJ, D'Arcy CJ, Gray ME, Steffey KL, Isard SA, et Orwick PL. (2001)** Occurrence and distribution of *Aphis glycines* on soybeans in Illinois in 2000 and its potential control. [En ligne] *Plant Health Progress*: [www.plantmanagementnetwork.org/pub/php/brief/aphisglycines](http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/php/brief/aphisglycines). Consulté le 05 mai 2011.

- Haubruge E., et Amichot M. (1998)** Les mécanismes responsables de la résistance aux insecticides chez les insectes et les acariens. *Biotechnology Agronomy Society and Environment* **2**: 161-174.
- He X, Wang Q, et Teulon D. (2004)** Emergence, sexual maturation and oviposition of *Aphidius ervi* (Hymenoptera: Aphidiidae). *New Zealand Plant Protection* **57**: 214-220.
- Heimpel GE, et Shelly TE. (2004)** The soybean aphid a review of its biology and management. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 203.
- Heimpel GE, Ragsdale DW, Venette R, Hopper KR, O'Neil RJ, Rutledge CE, et Wu Z. (2004)** Prospects for importation biological control of the soybean aphid: anticipating potential costs and benefits. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 249-258.
- Heimpel GE, Frelich LE, Landis DA, Hopper KR, Hoelmer KA, Sezen Z, Asplen MK, et Wu K. (2010)** European buckthorn and Asian soybean aphid as components of an extensive invasional meltdown in North America. *Biological Invasions* **12**: 2913-2931.
- Heimpel GE, et Asplen MK. (2011)** A 'Goldilocks' hypothesis for dispersal of biological control agents. *BioControl* **56**: 441-450.
- Heraty JM, Woolley JB, Hopper KR, Hawks DL, Kim JW, et Buffington M. (2007)** Molecular phylogenetics and reproductive incompatibility in a complex of cryptic species of aphid parasitoids. *Molecular Phylogenetics and Evolution* **45**: 480-493.
- Hill CB, Li Y, et Hartman GL. (2004)** Resistance of *Glycine* species and various cultivated legumes to the soybean aphid (Homoptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology* **97**: 1071-1077.
- Hirano K, Honda K, et Miyai S. (1996)** Effects of temperature on development, longevity and reproduction of the soybean aphid, *Aphis glycines* (Homoptera: Aphididae). *Applied Entomology and Zoology* **31**: 178-180.
- Hodgson E, Venette R, Abrahamson M, et Ragsdale D. (2005)** Alate production of soybean aphid (Homoptera: Aphididae) in Minnesota. *Environmental Entomology* **34**: 1456-1463.

- Huang ZH, Feng MG, Chen XX, et Liu SS. (2008)** Pathogenic fungi and parasitoids of aphids present in air captures of migratory alates in the low-latitude plateau of Yunnan, China. *Environmental Entomology* **37**: 1264-1271.
- Hunt D, Footitt R, Gagnier D, et Baute T. (2003)** First Canadian records of *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae). *The Canadian Entomologist* **135**: 879-881.
- Hymowitz T. (1970)** On the domestication of the soybean. *Economic Botany* **24**: 408-421.
- Jean C, Belzile L, Labrie G, Parent C, et Roy M. (2010)** Lutte intégrée contre le puceron du soya. Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec. [En ligne] [www.agrireseau.qc.ca](http://www.agrireseau.qc.ca). Consulté le 05 mai 2011.
- Jeyaratnam J. (1990)** Acute pesticide poisoning: a major global health problem. *World Health Statistics Quarterly* **43**: 139-144.
- Kaiser ME, Noma T, Brewer MJ, Pike KS, Vockeroth J, et Gaimari SD. (2007)** Hymenopteran parasitoids and dipteran predators found using soybean aphid after its midwestern United States invasion. *Annals of the Entomological Society of America* **100**: 196-205.
- Kalule, T, et Wright D. (2004)** The influence of cultivar and cultivar-aphid odours on the olfactory response of the parasitoid *Aphidius colemani*. *Journal of Applied Entomology* **128**: 120-125.
- Kim Y, Krafur E, Bailey T, et Zhao S. (1995)** Mode of inheritance of face fly diapause and its correlation with other developmental traits. *Ecological Entomology* **20**: 359-366.
- Labrie G. (2010)** Synthèse de la littérature scientifique sur le puceron du soya, *Aphis glycines* Matsumura. 54p.
- La financière agricole. (2011)** Statistiques: Assurance stabilisation. Coût de production, revenu stabilisé et caractéristiques techniques [En ligne] [http://www.fadq.qc.ca/fr/statistiques\\_et\\_taux/statistiques/assurance\\_stabilisation/out\\_de\\_production/soya.html?0](http://www.fadq.qc.ca/fr/statistiques_et_taux/statistiques/assurance_stabilisation/out_de_production/soya.html?0). Consulté le 19 août 2011.
- Lamb R, Turnock W, et Hayhoe H. (1985)** Winter survival and outbreaks of bertha armyworm, *Mamestra configurata* (Lepidoptera: Noctuidae), on canola. *The Canadian Entomologist* **117**: 727-736.

- Langhof M, Meyhöfer R, Poehling H-M, et Gathmann A. (2005)** Measuring the field dispersal of *Aphidius colemani* (Hymenoptera : Braconidae). *Agriculture, Ecosystems and Environment* **107**: 137-143.
- Leather SR, Walter KFA, et Bale J. (1993)** The ecology of insect overwintering. Cambridge University Press, 255 p.
- Leroy P, Capella Q, et Haubruge É. (2009)** L'impact du miellat de puceron au niveau des relations tritrophiques entre les plantes-hôtes, les insectes ravageurs et leurs ennemis naturels. *Biotechnology Agronomy Society and Environment* **13**: 325-334.
- Li CS, Luo RW, Yang CL, Shang YF, Zhao JH, et Xin XQ. (2000)** Biology and control of *Aphis glycines*. *Soybean Science* **19**: 337-340.
- Li Y, Hill CB, et Hartman GL. (2004)** Effect of three resistant soybean genotypes on the fecundity, mortality, and maturation of soybean aphid (Homoptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology* **97**: 1106-1111.
- Lin C, Li L, Wang Y, Xun Z, Zhang G, et Li S. (1993)** Effects of aphid population on the major economic parameters of soybean. *Soybean Science* **12**: 252-254.
- Lin L, et Ives A. (2003)** The effect of parasitoid host-size preference on host population growth rates: an example of *Aphidius colemani* and *Aphis glycines*. *Ecological Entomology* **28**: 542-550.
- Liu J, Wu K, Hopper KR, et Zhaob K. (2004)** Population dynamics of *Aphis glycines* (Homoptera: Aphididae) and its natural enemies in soybean in Northern China. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 235-239.
- Macedo TB, Bastos CS, Higley LG, Ostlie KR, et Madhavan S. (2003)** Photosynthetic responses of soybean to soybean aphid (Homoptera: Aphididae) injury. *Journal of Economic Entomology* **96**: 188-193.
- Messing RH, et Rabasse J. (1995)** Oviposition behaviour of the polyphagous aphid parasitoid *Aphidius colomani* Viereck (Hymenoptera: Aphidiidae). *Agriculture, Ecosystems and Environment* **52**: 13-17.
- Messing RH, et Wright MG. (2006)** Biological control of invasive species: solution or pollution? *Frontiers in Ecology and the Environment* **4**: 132-140.

- Miao J, Wu K, Hopper KR, et Li G. (2007)** Population dynamics of *Aphis glycines* (Homoptera: Aphididae) and impact of natural enemies in Northern China. *Environmental Entomology* **36**: 840-848.
- Mignault M-P, Roy M, et Brodeur J. (2006)** Soybean aphid predators in Québec and the suitability of *Aphis glycines* as prey for three Coccinellidae. *BioControl* **51**: 89-106.
- Multigner L. (2005)** Effets des pesticides sur la santé humaine. *Environnement, Risque et Santé* **4**: 187-194.
- Murdoch WW, Chesson J, et Chesson PL. (1985)** Biological control in theory and practice. *The American Naturalist* **125**: 344-366.
- Myers SW, Hogg DB, et Wedberg JL. (2005)** Determining the optimal timing of foliar insecticide applications for control of soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) on soybean. *Journal of Economic Entomology* **98**: 2006-2012.
- Newton P, et Odendaal W. (1990)** Commercial inundative releases of *Trichogrammatoidea cryptophlebiae* (Hym.: Trichogrammatidae) against *Cryptophlebia leucotreta* (Lep.: Tortricidae) in citrus. *BioControl* **35**: 545-556.
- Nielsen C, et Hajek AE. (2005)** Control of invasive soybean aphid, *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae), populations by existing natural enemies in New York State, with emphasis on entomopathogenic fungi. *Environmental Entomology* **34**: 1036-1047.
- Noma T, et Brewer MJ. (2008)** Seasonal abundance of resident parasitoids and predatory flies and corresponding soybean aphid densities, with comments on classical biological control of soybean aphid in the Midwest. *Journal of Economic Entomology* **101**: 278-287.
- Nowierski RM, et Fitzgerald BC. (2002)** Supercooling capacity of Eurasian and North American populations of parasitoids of the Russian wheat aphid, *Diuraphis noxia*. *BioControl* **47**: 279-292.
- Organisation météorologique mondiale (2011)** Official Observations. Official Forecasts. [En ligne] <http://worldweather.wmo.int/>. Consulté le 01 août 2011.



- Ostlie K. (2001)** Soybean aphid reduces yields: harvest results from insecticide strip trials. University of Minnesota. [En ligne]: <http://www.soybeans.umn.edu/crop/insects/aphid>. Consulté le 05 mai 2011.
- Parent C. (2006)** Puceron du soya : présence confirmée en Montérégie et dans Lanaudière. Bulletin du RAP-Grande Culture **No 05**, 22 juin 2006 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 05 avril 2011.
- Parent C. (2007)** Puceron du soya : déjà présent en Montérégie-ouest, en Ontario et au Michigan. Bulletin du RAP-Grande Culture **No 02**, 4 juin 2007 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 05 avril 2011.
- Parent C. (2009)** Stratégie puceron du soya: fin des activités du réseau de surveillance Bulletin du RAP-Grande Culture **No 32**, 28 août 2009 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 05 avril 2011.
- Parent C. (2011)** Stratégie puceron du soya: fin des activités du réseau de surveillance Bulletin du RAP-Grande Culture **No 55**, 26 août 2011 [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 28 août 2011.
- Pike K, Stary P, Brewer M, Noma T, Langley S, et Kaiser M. (2007)** A new species of *Binodoxys* (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae), parasitoid of the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura, with comments on biocontrol. Proceedings of the Entomological Society of Washington **109**: 359-365.
- Pimentel D, Lach L, Zuniga R, et Morrison D. (2000)** Environmental and economic costs of non indigenous species in the United States. BioScience **50**: 53-65.
- Plant-Prod Québec. (2007)** Catalogue: Serres / Pépinières: Protection biologique des cultures: contre le puceron: *Aphidius colemani*. [En ligne] <http://www.plantprod.com/catalogue.php?section=28&id=312>. Consulté le 02 avril 2010.
- Ragsdale DW, Voegtlin DJ, et O'Neil RJ. (2004)** Soybean aphid biology in North America. Annals of the Entomological Society of America **97**: 204-208.
- Ragsdale D, McCornack B, Venette R, Potter B, Macrae I, Hodgson E, O'Neal M, Johnson K, O'Neil R, et DiFonzo C. (2007)** Economic threshold for soybean aphid (Hemiptera: Aphididae). Journal of Economic Entomology **100**: 1258-1267.

- Ragsdale DW, Landis DA, Brodeur J, Heimpel GE, et Desneux N. (2011)** Ecology and management of the soybean aphid in North America. *Annual Review of Entomology* **56**: 375-399.
- Rhainds M, Roy M, Daigle G, et Brodeur J. (2007)** Toward management guidelines for the soybean aphid in Quebec. I. Feeding damage in relationship to seasonality of infestation and incidence of native predators. *The Canadian Entomologist* **139**: 728-741.
- Rhainds M, Brodeur J, Borcard D, et Legendre P. (2008)** Toward management guidelines for soybean aphid, *Aphis glycines*. Québec II Spatial distribution of aphid populations in commercial soybean fields. *The Canadian Entomologist* **140**: 219-234.
- Rochefort S, Berthiaume R, Hébert C, Charest M, et Bauce E. (2011)** Effect of temperature and host tree on cold hardiness of hemlock looper eggs along a latitudinal gradient. *Journal of Insect Physiology* **57**: 751-759.
- Roy M, et Lachance P (2005)** C'est confirmé, le puceron du soya passe l'hiver dans le sud-ouest du Québec. *Bulletin du RAP-Grandes Cultures* **No 6**, 29 juin 2005. [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap>. Consulté le 10 mai 2010.
- Roy M, et Leclerc M-E. (2005)** Les insectes et acariens dans la culture du soya au Québec. [En ligne] [www.agrireseau.qc.ca](http://www.agrireseau.qc.ca). Consulté le 10 mai 2010.
- Roy M. (2008)** Le puceron du soya : Statut du ravageur et stratégie de lutte. *Grandes cultures* : Octobre 2008.
- Rutledge CE, O'Neil RJ, Fox TB, et Landis DA. (2004)** Soybean aphid predators and their use in integrated pest management. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 240-248.
- Rutledge CE, et O'Neil RJ. (2005)** *Orius Insidiosus* (Say) as a predator of the soybean aphid, *Aphis Glycines* Matsumura. *Biological Control* **33**: 56-64.
- Sage pesticides. (2011)** Traitements phytosanitaires et risques associés. [En ligne] <http://www.sagepesticides.qc.ca/>. Consulté le 05 avril 2011.

- Sakai AK, Allendorf FW, Holt JS, Lodge DM, Molofsky J, With KA, Baughman S, Cabin RJ, Cohen JE, Ellstrand NC, McCaulay DE, O'Neil P, Parker IM, Thompon JN, et Weller SG. (2001)** The population biology of invasive species. *Annual Review of Ecology and Systematics* **32**: 305-332.
- Somme L. (1982)** Supercooling and winter survival in terrestrial arthropods. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* **73**: 519-543.
- Statistique Canada. (2011)** Tableau 001-0017 : Estimation de la superficie, du rendement, de la production, du prix moyen à la ferme et de la valeur totale à la ferme des principales grandes cultures, en unités impériales, annuel, CANSIM (base de données), E-STAT (distributeur). [En ligne] [http://estat.statcan.gc.ca/cgiwin/cnsmcgi.exe?Lang=F&ESTFi=EStat/Francais/CII\\_1-fra.htm](http://estat.statcan.gc.ca/cgiwin/cnsmcgi.exe?Lang=F&ESTFi=EStat/Francais/CII_1-fra.htm). Consulté le 02 août 2011.
- Tauber M, Tauber C, et Masaki S. (1984)** Adaptations to hazardous seasonal conditions: Dormancy, migration, and polyphenism. Dans *Ecological Entomology* (Ed. par Huffaker CB, et Rabb RL.) Wiley New-York: 149-183.
- Van den Berg H, Ankasah D, Muhammad A, Rusli R, Widayanto H, Wirasto H, et Yully I. (1997)** Evaluating the role of predation in population fluctuations of the soybean aphid *Aphis glycines* in farmer's fields in Indonesia. *Journal of Applied Ecology* **34**: 971-984.
- Venette RC, et Ragsdale DW. (2004)** Assessing the invasion by soybean aphid (Homoptera : Aphididae) : Where will it end? *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 219-226.
- Viggiani G. (1984)** Bionomics of the Aphelinidae. *Annual Review of Entomology* **29**: 257-276.
- Vincent C, Goettel MS, et Lazarovits G. (2007)** Biological control: a global perspective: CABI Publishing. 440 p.
- Voegtlin DJ, O'Neil RJ, et Graves WR. (2004)** Tests of suitability of overwintering hosts of *Aphis glycines*: identification of a new host association with *Rhamnus alnifolia* L'Héritier. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 233-234.
- Voegtlin DJ, O'neil RJ, Graves WR, Lagos D, et Yoo HJS. (2005)** Potential winter hosts of soybean aphid. *Annals of the Entomological Society of America* **98**: 690-693.

- Wang CL, Xiang NY, Zhang GS, Zhu HF. (1962)** Studies on the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura. *Acta Entomologica Sinica* **11**: 31-44.
- Wang R, Kritzman A, Hershman D, et Ghabrial S. (2006)** *Aphis glycines* as a vector of persistently and non persistently transmitted viruses and potential risks for soybean and other crops. *Plant Disease* **90**: 920-926.
- Wang Y, et Ba F. (1998)** Study on the optimum control of soybean aphid. *Acta Phytopylacica Sinica* **25**: 151-155.
- Wu Z, Hamlin D, Zhan W, Ragsdale D, et Heimpel G. (2004)** The soybean aphid in China: a historical review. *Annals of the Entomological Society of America* **97**: 209-218.
- Wyckhuys KAG, Koch RL, et Heimpel GE. (2007)** Physical and ant-mediated refuges from parasitism: Implications for non-target effects in biological control. *Biological Control* **40**: 306-313.
- Wyckhuys K, Stone L, Desneux N, Hoelmer K, Hopper K, et Heimpel G. (2008)** Parasitism of the soybean aphid, *Aphis glycines* by *Binodoxys communis*: the role of aphid defensive behaviour and parasitoid reproductive performance. *Bulletin of Entomological Research* **98**: 361-370.
- Wyckhuys KAG, Koch RL, Kula RR, et Heimpel GE. (2009)** Potential exposure of a classical biological control agent of the soybean aphid, *Aphis glycines*, on non-target aphids in North America. *Biological Invasions* **11**: 857-871.
- Yoo HJS, O'neil RJ, Voegtlin DJ, et Graves WR. (2005)** Host plant suitability of Rhamnaceae for soybean aphid (Homoptera: Aphididae). *Annals of the Entomological Society of America* **98**: 926-930.
- Yu D. (1992)** Effects of photoperiod and temperature on diapause of two *Aphelinus* spp. (Hymenoptera: Aphelinidae) parasitizing the Russian wheat aphid. *The Canadian Entomologist* **124**: 853-860.
- Zachariassen KE. (1985)** Physiology of cold tolerance in insects. *Physiological Reviews* **65**: 799-832.

**Zhang Y, Wang L, Wu K, Wyckhuys KAG, et Heimpel GE. (2008)** Flight performance of the soybean aphid, *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) under different temperature and humidity regimens. *Environmental Entomology* **37**: 301-306.