

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACTS DE DEUX INSECTICIDES À RISQUES RÉDUITS SUR UN PRÉDATEUR  
ENVAHISSANT ET SUR SON COMPÉTITEUR INDIGÈNE

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

PAULA CABRERA BLANCO

JANVIER 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

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

## REMERCIEMENTS

Bien que beaucoup de personnes aient été importantes pour moi lors de mon parcours dans ce doctorat, je tiens à remercier particulièrement Éric Lucas, mon directeur de recherche. Gracias por haber estado siempre presente en estos seis años. Merci pour ton soutien et ta confiance. J'ai bien apprécié ta disponibilité pour discuter de mes coccinelles, même si parfois tu étais débordé de travail. Merci aussi de m'avoir encouragé à entreprendre d'autres activités qui ont énormément contribué à ma formation dans ce doctorat, l'enseignement et l'encadrement des étudiants d'initiation à la recherche. Merci aussi pour ton accompagnement lors de dernières semaines avant le dépôt de ma thèse.

Muchas gracias aussi à mon codirecteur, Daniel Cormier. J'ai apprécié énormément sa disponibilité pour répondre à mes questions et pour discuter de mon projet dans une optique de recherche appliquée. J'ai apprécié aussi sa compagnie lors de notre voyage en Belgique pour présenter nos recherches au groupe de travail Pesticides et Organismes Utiles de l'OILB. Et merci, Daniel, de m'avoir donné l'opportunité de présenter mes résultats de recherche aux JARITS en 2013 et en 2014 et de me faire connaître le monde de la pomme.

Un gros merci à Marc Fournier, sans lui cette étude (ainsi que beaucoup d'autres) n'aurait été pas possible. Merci Marc pour ton appui et ton calme pour résoudre tous les imprévus avec les élevages des coccinelles, pucerons, patates et autres, et j'en ai eu beaucoup.

Je remercie, bien sûr Franz Vanoosthuysse de l'IRDA pour son soutien technique lors des essais de laboratoire et de terrain, pour son aide avec le résumé graphique de

ma deuxième publication et pour avoir contribué au divertissement lors de la prise des données dans le verger, aux JARITS, au laboratoire et lors des voyages aux congrès de la SEQ.

Je remercie tous les étudiants stagiaires du Cégep Saint-Laurent qui m'ont aidé énormément avec l'élevage des coccinelles et avec la prise de données : Simon Pierre Boucher, Valérie Anne Codina-Fouteaux, Miguel Silva, Chloé Savoie et Maryse Pelletier. Merci aussi aux étudiants de premier cycle de l'UQAM, Laurent Fraser, Pascal Chhai, Mouna Khene, Marianne Bessette et Vanessa Cruz. Aussi, Sani Oumarou du Carrefour BLE. Vous êtes les meilleurs !!

Merci aussi à Jill Vandermeerschen pour son appui avec les analyses statistiques. Son aide et sa sympathie sont très appréciées.

Merci à Éric Duchemin pour m'avoir fait découvrir l'agriculture urbaine et à tous les professeurs passionnés du programme du Doctorat en sciences de l'environnement qui ont contribué à ma formation et avec lesquels j'ai eu le plaisir de partager de moments enrichissants de discussions sur l'environnement dans tous ses états.

Merci à mes collègues du laboratoire de lutte biologique de l'UQAM, ça a été un plaisir de partager toutes ces années avec vous : Olivier Aubry, Julie-Éléonore Maisonhaute, Marie-Ève Gagnon, Julie Marigil, Ymilie Francoeur, Stéphane Barriault, François Dumont, Mylène St-Onge, Jonathan Bernardo-Santos, Aurélien Stirnemann, Audrey Lafrenaye et Didier Labarre. Et un muchas gracias très grand à Mathieu Lemieux, pour avoir fait des photos des coccinelles à couper le souffle.

Merci à toutes les coccinelles maculées, les coccinelles asiatiques, et autres prédateurs et proies, qui ont été sacrifiés afin d'obtenir des données pour mon doctorat.

Enfin, je remercie ma chère famille pour sa patience et support pendant ce doctorat. Merci à Raphaël, mon compagnon depuis 17 ans et le meilleur papa du monde. Sans ton amour et ta patience je n'aurais pas pu me rendre jusqu'ici. Merci à Gabriel, Salvador et Avril pour leur patience avec Maman quand j'étais au laboratoire les fins de semaine et sur l'ordinateur les soirs. Merci pour vos sourires et votre joie et merci d'être vous-mêmes.

## **DÉDICACE**

**À mi bella y querida familia,  
Raphaël, Gabriel, Salvador y Avril.**

**À mi madre Teresa Blanco  
y a mi abuelo Jorge Cabrera**

## AVANT PROPOS

Mon doctorat traite des effets des insecticides portant l'appellation « à risques réduits », sur les ennemis naturels des ravageurs des cultures. Plus spécifiquement, mon étude a exploré les effets de deux insecticides à risques réduits, utilisés dans les vergers des pommiers au Québec sur deux prédateurs généralistes, une coccinelle indigène et une coccinelle envahissante. Cette thèse est composée de trois chapitres sous la forme d'articles scientifiques. Le premier est déjà publié et le deuxième a été soumis pour publication.

Ce projet de doctorat a commencé en 2012 et été financé par le Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA), administré par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ), par le programme Prime-vert du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CSNRG) et par le Fond canadien de l'innovation (FCI). La direction du doctorat a été faite par Éric Lucas, de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et la codirection par Daniel Cormier, de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Les résultats exposés dans ce document proviennent des études faites au Laboratoire de lutte biologique de l'UQAM à Montréal, ainsi qu'au laboratoire d'entomologie de l'IRDA situé à St-Bruno de Montarville.

L'originalité de mon doctorat est fondée sur l'utilisation de deux approches : à savoir, une approche toxicologique utilisant les critères méthodologiques de l'Organisation internationale de lutte biologique (OILB-SROP) et aussi une approche écologique d'analyse de l'effet des insecticides sur l'interaction des deux espèces de

prédateurs. Ainsi, cette recherche a permis de connaître la susceptibilité de deux prédateurs généralistes à deux insecticides à risques réduits utilisés dans plusieurs écosystèmes agricoles. Nous avons mis en évidence que l'espèce envahissante est très susceptible à un des insecticides, tandis que son équivalent indigène ne l'est pas, ce qui laisse présumer des conséquences importantes sur la dominance entre les deux espèces et sur la diversité fonctionnelle des ennemis naturels dans plusieurs cultures. Du reste, de l'information appliquée, d'intérêt pour les producteurs de pommes au Québec, a été générée, ainsi que des connaissances au niveau plus fondamental, permettant d'avoir une meilleure compréhension de l'impact des insecticides sur les ennemis naturels.



## TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS .....	I
LISTE DE FIGURES .....	VIII
LISTE DE TABLEAUX .....	XII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	XIV
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS .....	XV
INTRODUCTION .....	1
I.1. LES PESTICIDES EN AGRICULTURE .....	1
I.2. LA LUTTE CHIMIQUE DANS LES VERGERS DE POMMIERS .....	5
I.3. SÉLECTIVITÉ DES INSECTICIDES .....	8
I.4. INSECTICIDES À RISQUES RÉDUITS .....	9
I.4.1. L'insecticide chlorantraniliprole et sa formulation commerciale Altacor® 35 WP	15
I.4.2 L'insecticide novaluron et sa formulation commerciale Rimon® 10 EC.....	21
I.5. EXPOSITION DES ENNEMIS NATURELS AUX INSECTICIDES .....	26
I.6. IMPACT DES INSECTICIDES SUR LES ENNEMIS NATURELS ET SUR LA LUTTE BIOLOGIQUE .....	28
I.7. GUILDE APHIDIPHAGE DANS LES VERGERS DE POMMIERS .....	30
I.7.1. Assemblage de coccinelles .....	31
I.7.1.1. La coccinelle maculée, <i>Coleomegilla maculata</i> .....	32
I.7.1.2. La coccinelle asiatique, <i>Harmonia axyridis</i> .....	34
I.7.2. La coccinelle asiatique en tant qu'envahisseur.....	34
I.8. PREDATION INTRAGUILDE .....	37
I.9. LA COCCINELLE ASIATIQUE COMME SUPER PRÉDATEUR ?.....	40
I.10. INTERACTIONS ENTRE <i>C. MACULATA</i> ET <i>H. AXYRIDIS</i> .....	41
I.11. SUSCEPTIBILITÉ DES COCCINELLES AU CHLORANTRANILIPROLE ET AU NOVALURON	43
I.12. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE.....	48
I.12.1. Objectif 1 .....	48

I.12.2. Objectif 2 .....	50
I.12.3. Objectif 3 .....	51
CHAPITRE I.....	54
<b>DIFFERENTIAL SENSITIVITY OF AN INVASIVE AND AN INDIGENOUS LADYBEETLE TO TWO REDUCED-RISK INSECTICIDES .....</b>	<b>54</b>
ABSTRACT / RÉSUMÉ.....	55
1.1. INTRODUCTION .....	57
1.2. MATERIALS AND METHODS .....	60
1.2.1. Insects.....	60
1.2.2. Insecticides .....	61
1.2.3. Bioassays .....	61
1.2.3.1. Topical contact .....	62
1.2.3.2. Ingestion.....	63
1.2.3.3. Residual contact .....	63
1.2.4. Statistical analyses.....	64
1.3. RESULTS.....	64
1.3.1. Topical exposure .....	64
1.3.1.1. Eggs.....	64
1.3.1.2. Larvae .....	65
1.3.2. Ingestion of treated prey.....	67
1.3.3. Contact with residues.....	70
1.4. DISCUSSION .....	73
1.5. ACKNOWLEDGMENTS .....	78
1.6. REFERENCES .....	78
CHAPITRE II.....	88
<b>SUBLETHAL EFFECTS OF TWO REDUCED-RISK INSECTICIDES: WHEN THE INVASIVE LADYBEETLE IS DRASTICALLY AFFECTED WHEREAS THE INDIGENOUS NOT .....</b>	<b>88</b>
ABSTRACT / RÉSUMÉ.....	89
2.1. INTRODUCTION .....	91

2.2. MATERIALS AND METHODS .....	93
2.2.1. Insects.....	93
2.2.2. Insecticides.....	94
2.2.3. Bioassay.....	94
2.2.4. Effects of insecticides per species.....	95
2.2.5. Comparing effects of insecticides between <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> . ....	95
2.2.5.1. Fecundity.....	96
2.2.5.2. Hatching rate.....	96
2.2.5.3. Fertility .....	97
2.2.6. Calculations and statistical analyses .....	98
2.3. RESULTS.....	99
2.3.1. Adult mortality .....	99
2.3.2. Sublethal effects on reproduction of each species .....	99
2.3.2.1. Fecundity, hatching rate, and fertility.....	99
2.3.2.2. Egg hatch over time.....	101
2.3.2.3. Effect on oviposition pattern .....	103
2.3.3. Comparative impact of insecticides on reproduction.....	106
2.4. DISCUSSION.....	108
2.4.1. Impact of insecticides on each ladybeetle .....	108
2.4.2. Comparing insecticide sublethal effects between <i>C. maculata</i> and <i>H. axyridis</i> . ....	110
2.4.3. Implications in the field.....	113
2.5. ACKNOWLEDGMENTS .....	114
2.6. REFERENCES .....	115
CHAPITRE III.....	123
WHEN AN INSECTICIDE AFFECTS THE ADAPTIVE VALUE OF INTRAGUILD PREDATION BY AN INVADER.....	123
ABSTRACT / RÉSUMÉ.....	124
3.1. INTRODUCTION .....	126
3.2. Materials and Methods.....	130

3.2.1. Insects.....	130
3.2.2. Insecticide.....	130
3.2.3. Bioassays .....	130
3.2.3.1. Effect of the insecticide on intraguild predation .....	131
3.2.3.2. Neutralisation of the insecticide by the indigenous intraguild prey, <i>C. maculata</i> , and its effect on the invasive intraguild predator <i>H. axyridis</i> . ....	132
3.2.4. Calculations and statistical analyses .....	134
3.3. RESULTS.....	135
3.3.1. Effect of the insecticide on intraguild predation.....	135
3.3.1.1. Voracity of intraguild predators .....	135
3.3.1.2. Mortality-survival of intraguild predators.....	136
3.3.1.3. Developmental time and weight increase (indigenous ladybeetle) .....	138
3.3.2. Neutralisation of the insecticide by the indigenous intraguild prey and its effect on the invasive intraguild predator.....	140
3.3.2.1. Voracity of the invasive ladybeetle .....	140
3.3.2.2. Mortality-survival of the invasive ladybeetle as the intraguild predator ....	141
3.3.2.3. Time of development and weight increase of the invasive ladybeetle .....	143
3.4. DISCUSSION .....	145
3.4.1. Effect of the insecticide on the adaptive value of IGP for the invasive and the indigenous predators .....	145
3.4.2. Neutralisation of intraguild prey and its effect on the intraguild predator .....	147
3.5. ACKNOWLEDGEMENTS .....	150
3.6. REFERENCES .....	150
DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE .....	160
II.1. RESULTATS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE .....	160
II.2. INFORMATION ADDITIONNELLE GÉNÉRÉE LORS DU DOCTORAT.....	166
II.2.1. Impact du novaluron sur la nymphose chez <i>C. maculata</i> et <i>H. axyridis</i> .....	166
II.2.2. Effet létal de l'Altacor® et du Rimon® sur huit ennemis naturels présents dans les vergers québécois .....	167
II.2.3.1. Essais de terrain (acariens prédateurs).....	167

II.2.3.2. Essais de laboratoire .....	168
II.3. DIFFUSION DES RÉSULTATS.....	169
II.4. IMPLICATIONS DE L'INFORMATION GÉNÉRÉE PAR LE DOCTORAT ET SUITE DES ÉTUDES .....	171
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>177</b>

## LISTE DE FIGURES

Figure	Page
I.1 Structure chimique du chlorantraniliprole, 3-brome-4'-chloro-1-(3-chloro-2-pyridyl) -2'-méthyle -6'- (methylcarbamoyle) pyrazole -5-carboxanilide (tiré du Jeanguenat, 2013).....	15
I.2 Représentation schématique du récepteur de la ryanodine et de sa fonction. Le récepteur module la libération des ions du calcium provenant du réticulum sarcoplasmique vers le cytoplasme des cellules des muscles des insectes (modifié à partir de Lahm <i>et al.</i> , 2009).....	16
I.3 Structure chimique du novaluron. 1-[3-Chloro-4-(1,1,2-trifluoro-2-trifluoro-methoxyethoxy) phenyl]-3-(2,6-difluorobenzoyl) urée (tiré de Cutler et Scott-Dupree, 2007). .....	22
I.4 Conséquences possibles des pesticides sur l'efficacité des ennemis naturels à lutter contre les ravageurs (adapté d'Hardin <i>et al.</i> , 1995).....	29
1.1 Cumulative mortality of <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> , following topical exposure of 1 <sup>st</sup> instar larvae to chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) at 24 (a), 72 h (c), and 6 d (e) and to novaluron (Rimon® 10 EC) at 24 (b), 72 h (d), and 6 d (f) (mean % ± SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test, $\alpha = 0.05$ ).....	66
1.2 Cumulative mortality of 1 <sup>st</sup> instar larvae of <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> , following ingestion of treated preys during 24 h, with chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) at 24 (a), 72 h (c), and 6 d (e), and novaluron (Rimon® 10 EC) at 24 (b), 72 h (d), and 6 d (f) (mean % ± SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test, $\alpha = 0.05$ ). .....	69

1.3	Cumulative mortality of 1 <sup>st</sup> instar larvae of <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> following residual contact with chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) at 24 h (a), 72 h (c), and 6 days (e) and novaluron (Rimon® 10 EC) at 24 (b), 72 h (d), and 6 d (f) after start of exposure (mean % ± SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test, $\alpha = 0.05$ ).....	72
2.1	Predicted probability of egg hatch over time in each treatment. <i>C. maculata</i> (a) and <i>H. axyridis</i> (b) following ingestion of preys treated with water, chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) (Logistic Mixed Model with random intercept). .....	102
2.2	Oviposition pattern (mean ± SE): Total number of egg clusters and size of egg clusters for (a) <i>C. maculata</i> and (b) <i>H. axyridis</i> following ingestion of prey treated with water, chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) or novaluron (Rimon® 10 EC). (Kruskal-Wallis or ANOVA, $\alpha = 0.05$ ). .....	105
2.3	Comparative impact of insecticides (relative to their respective control) on <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> 's reproduction after ingestion of treated prey. Hundred percent fertility represents fertility in water control. a) Cumulative fecundity (eggs per female after 15 days). b) Hatching rate after 15 days. c) Cumulative fertility (larvae per female after 15 days). Different letters indicate statistically significant differences between species (Kruskal-Wallis or t test, $\alpha = 0.05$ ). Values higher than 100% are not showed. ....	107
2.4	Simulation of larval production from 100 females, of <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> , after 15 days in normal conditions (a) and exposed to prey treated with novaluron (b). Calculations are based on results from tables 1 and 2 assuming there is no neonatal sibling cannibalism.....	112
3.1	Experimental design used to assess the effect of novaluron on IGP. Each experimental unit consisted of a second instar larva (intraguild predator) placed with five 1 <sup>st</sup> instar newly hatched larvae from the opposite coccinellid species. Each experimental unit was replicated 17 times.....	132

- 3.2 a) Mortality of the indigenous ladybeetle as the intraguild predator and b) Mortality of the invasive ladybeetle as the intraguild predator, after 24 h exposure of 2<sup>nd</sup> instar larvae (intraguild prey) to water or insecticide treated preys. Chi<sup>2</sup> ( $p < 0.05$ ). c) Survival and time of death of intraguild predators after ingestion of intraguild prey treated with water and d) treated with the insecticide. Kaplan-Meier survival curves ( $p < 0.05$ )..... 137
- 3.3 a) Time of development (days + SE) and b) weight increase (mg ± SE) of the indigenous ladybeetle, from 2<sup>nd</sup> instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide. Student t test ( $p < 0.05$ )..... 139
- 3.4 a) Mortality of the invasive ladybeetle (intraguild predator), after 24 h exposure of 3<sup>rd</sup> instar larvae to water or insecticide-treated intraguild preys (IG-Water and IG-Insecticide respectively), and for extraguild prey treated with water (XG-Water) in treatments of neutralisation of the insecticide by the intraguild prey (Chi<sup>2</sup> ( $\alpha = 0.05$ )) and b) survival of intraguild predators after ingestion of intraguild prey treated with insecticide in three neutralisation treatments. Kaplan-Meier survival curves ( $p < 0.05$ ). **T0**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated, and immediately euthanized; **T-24h**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized 24 h after; **T-Molt**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized after molt to 2<sup>nd</sup> instar; **XG-Water**: Aphids treated with water; **IG-Water**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with water; **IG-Insecticide**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with insecticide (novaluron)..... 142
- 3.5 a) Time of development (days) of the invasive *H. axyridis*, from 3<sup>rd</sup> instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide and extraguild prey; b) Weight increase (mg) of *H. axyridis* from third instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with insecticide or water and extraguild prey. Wilcoxon test ( $\alpha = 0.05$ ). **T0**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated, and immediately euthanized; **T-24h**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized 24 h after; **T-Molt**:



first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized after molt to 2<sup>nd</sup> instar; **XG-Water**: Aphids treated with water; **IG-Water**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with water; **IG-Insecticide**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with insecticide (novaluron). ..... 144

## LISTE DE TABLEAUX

Tableau		Page
I.1	Effets du chlorantraniliprole sur les ennemis naturels des ravageurs dans différentes cultures .....	20
I.2	Effets du novaluron sur les ennemis naturels des ravageurs dans différentes cultures .....	25
I.3	Calendrier de la présence de quelques membres de la guildes des aphidiphages et des applications d'insecticides contre le carpocapse de la pomme dans les vergers de pommiers au Québec. Modifié à partir du Chouinard et Morin (2015).....	27
I.4	Taxonomie de la coccinelle maculée (Hodek <i>et al.</i> , 2012) .....	33
I.5	Taxonomie de la coccinelle asiatique (Hodek <i>et al.</i> , 2012) .....	34
I.6	Étude de laboratoire de prédation et cannibalisme par <i>H. axyridis</i> et <i>C. maculata</i> (Cottrell et Yeargan, 1998). .....	43
I.7	Facteurs influençant la susceptibilité des coccinelles <i>H. axyridis</i> et <i>C. maculata</i> aux insecticides. Les signes + et – représentent la contribution des facteurs à la susceptibilité à être négativement affecté par de composés toxiques. ....	47
1.1	IOBC toxicity classes for chlorantraniliprole and novaluron on <i>H. axyridis</i> and <i>C. maculata</i> eggs and larvae (1 <sup>st</sup> instar at the beginning of tests) at 6 days after start of exposure.....	73
2.1	Sublethal effects of chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) on reproduction of <i>C. maculata</i> following ingestion of insecticide-treated prey after 15 days (mean ± SE).....	100

2.2	Sublethal effects of chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) on reproduction of <i>H. axyridis</i> following ingestion of insecticide-treated preys after 15 days (mean ± SE).....	101
2.3	Logistic Regression Analysis for Fixed effects of egg hatch over time of <i>H. axyridis</i> (GLIMMIX procedure, $\alpha = 0.05$ ).....	103
2.4	Logistic Regression Analysis for Fixed effects of egg hatch over time of <i>C. maculata</i> (GLIMMIX procedure, $\alpha = 0.05$ ).....	103
3.1	Voracity of intraguild predators after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide. Comparisons within lines. Student t test ( $p < 0.05$ ).....	135
3.2	Voracity of <i>H. axyridis</i> after 24h preying upon extraguild and intraguild prey treated with insecticide or water. Comparisons within lines. ANOVA or Wilcoxon test ( $p < 0.05$ ).....	140
II.1	Résumé des effets de l'Altacor et du Rimon sur la coccinelle maculée et sur la coccinelle asiatique étudiés lors du doctorat (résultats des chapitres 1, 2 et 3 et du projet Impact du novaluron sur la nymphose chez <i>C. maculata</i> et <i>H. axyridis</i> .....	167
II.2	Toxicité du chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG; 145 g/ha) et du novaluron (Rimon®10 EC; 1 L/ha) sur des œufs 72 h après l'exposition et sur des larves 6 jours après l'exposition, sur six ennemis naturels aphidiphages présents dans les vergers de pommiers au Québec. Les concentrations des insecticides ont été calculées à partir d'un volume de pulvérisation de 1000 L/ha.....	170

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ARLA	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire
CSI	Inhibiteur de synthèse de la chitine
EPA	Environmental Protection Agency
IGR	Inhibiteur de la croissance
IGP	Prédation intraguilde
IRB	Indicateur de risque pour les espèces bénéfiques
IRE	Indice de risque pour l'environnement
IRR	Insecticide à risques réduits
IRS	Indice de risque pour la santé humaine
IRPeQ	Indicateur de risque des pesticides pour le Québec
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
OILB	Organisation international de lutte biologique
PFI	Production fruitière intégrée
RyR	Récepteur de la ryanodine

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

$\text{g a.i. ha}^{-1}$	Grammes d'ingrédient actif par litre
$\text{mg a.i. litre}^{-1}$	Milligrammes d'ingrédient actif par litre
cc	Centimètres cubiques
$\text{mg cm}^{-2}$	Milligrammes par centimètre carré

## RÉSUMÉ

L'évolution des pesticides chimiques de synthèse utilisés en agriculture se caractérise par une série de remplacements successifs des groupes chimiques. La réévaluation et le retrait des pesticides avec des impacts élevés pour la santé humaine et pour l'environnement ont encouragé le développement de pesticides dit « à risques réduits ». Ces derniers sont des composés réputés avoir un moindre impact pour la santé humaine et l'environnement et plus de sélectivité par rapport aux pesticides conventionnels. Toutefois, cette sélectivité n'est pas toujours confirmée par des recherches indépendantes.

Au Québec, où 10 % des pesticides utilisés en agriculture sont des insecticides, deux prédateurs généralistes couramment observés dans les systèmes agricoles sont confrontés aux « insecticides à risques réduits » (IRRs) ; la coccinelle maculée, *Coleomegilla maculata* (DeGeer), indigène de l'Amérique du Nord et la coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* Pallas, une des espèces d'arthropodes les plus envahissantes à travers le monde. Dans l'assemblage de coccinelles, la coccinelle asiatique s'avère une espèce dominante, car elle possède plusieurs traits avantageux par rapport aux autres espèces, tels son agressivité, sa voracité, son taux reproducteur, son habilité à s'adapter à différents environnements et également son statut de prédateur intragilde. La prédation intragilde est considérée comme l'un des facteurs déterminant le succès d'invasion de la coccinelle. Toutefois, malgré la dominance de la coccinelle asiatique, la coccinelle maculée demeure l'espèce indigène la plus courante dans les cultures où les deux prédateurs se rencontrent. Dans le cas des vergers de pommiers, les deux coccinelles sont présentes durant la période des traitements insecticides dirigés contre le carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* (L).

Le chlorantraniliprole (Altacor® 35 WP) et le novaluron (Rimon® 10 EC), sont deux insecticides à risques réduits, ovicides et larvicides, avec des modes d'action différents, utilisés pour lutter contre le carpocapse de la pomme. Le chlorantraniliprole appartient au groupe chimique de diamides anthraniliques et cause la paralysie musculaire des insectes, tandis que le novaluron est un inhibiteur

de synthèse de la chitine de la famille chimique de benzoylurées. Les effets toxiques de ces deux composés sur la coccinelle maculée et la coccinelle asiatique ne sont pas connus et on ne peut pas prévoir les implications pour leurs populations. Alors, l'objectif principal du présent doctorat est de comparer la susceptibilité de la coccinelle indigène *C. maculata* et de la coccinelle envahissante *H. axyridis* aux insecticides à risques réduits Altacor® (chlorantraniliprole) et Rimon® (novaluron).

L'effet létal et les effets sublétaux des insecticides sur les deux espèces de coccinelles ont été évalués en laboratoire. L'effet létal sur les œufs a été estimé par voie topique, par voie trophique/ingestion et par voie résiduelle pour les larves.

Les effets sublétaux sur la reproduction des coccinelles ont ensuite été examinés suivant l'exposition des adultes aux proies traités avec les insecticides. Il a été constaté que le chlorantraniliprole a un effet létal et des effets sublétaux négligeables sur les deux espèces de coccinelles et que le novaluron s'avère toxique uniquement pour la coccinelle asiatique. Ainsi, cet insecticide a causé de la mortalité sur plus de 90 % des larves, par voie topique et orale et a réduit de 30 % la fécondité et de 80 % la fertilité de cette espèce. Par contraste, les larves de la coccinelle maculée n'ont pas été affectées par le novaluron et aucune réduction de la performance reproductive de cette espèce n'a été constatée.

Étant donné que la prédation intragilde (IGP) est un facteur majeur contribuant à la dominance de la coccinelle asiatique sur ses compétiteurs (dont la coccinelle maculée) au sein des guildes d'ennemis naturels, l'effet de l'insecticide novaluron a été évalué sur la valeur adaptative de ce comportement pour chacune des deux coccinelles. Des larves de premier stade (proie intragilde) de chaque espèce ont été offertes aux larves de deuxième stade larvaire de la seconde espèce (prédateur intragilde) et le développement de ces dernières a été suivi jusqu'au stade adulte. Cette expérience a révélé qu'en présence du novaluron, la valeur adaptative de l'IGP pour la coccinelle envahissante est complètement perdue, tandis qu'elle est conservée chez la coccinelle indigène. Ceci implique que la coccinelle indigène peut s'attaquer à des stades vulnérables de la coccinelle envahissante même contaminées, alors que le contraire n'est pas vrai, l'espèce envahissante perd le bénéfice de la prédation. Néanmoins, il a été démontré que lorsque la coccinelle envahissante est le prédateur, la proie intragilde (coccinelle indigène moins affectée par l'insecticide) est capable de neutraliser l'insecticide après un certain

temps, ce qui redonne la valeur adaptative de l'IGP pour le prédateur intragilde (coccinelle envahissante susceptible à l'insecticide).

Au niveau appliqué, cette étude a généré de l'information d'intérêt pour la lutte intégrée et pour la compatibilité entre le contrôle naturel et la lutte chimique, car connaître l'impact des insecticides sur les ennemis naturels est essentiel. Au niveau fondamental, cette étude est la première à démontrer l'impact d'un pesticide sur la valeur adaptative de la prédation intragilde, et de ce fait sur les interactions intraguildes entre espèces envahissantes et indigènes. À partir de nos résultats, nous pouvons spéculer sur la baisse (voire la disparition) de la dominance de la coccinelle asiatique dans les guildes aphidiphages soumises à des traitements avec le novaluron. Il apparaît également essentiel de considérer la régie phytosanitaire des systèmes agricoles dans les évaluations des risques d'introduction des agents de lutte biologique exotique. Enfin, à la lumière des résultats, l'attribution du statut d'insecticide à risques réduits ne peut pas être généralisée pour l'ensemble des insectes et l'information générée par cette étude questionne les exigences d'homologation des insecticides à risques réduits.

**Mots-clés:** Insecticides à risques réduits, espèce envahissante, *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, susceptibilité, mortalité, fécondité, fertilité, prédation intragilde.



## INTRODUCTION

### I.1. LES PESTICIDES EN AGRICULTURE

L'utilisation de pesticides de synthèse pour lutter contre les ravageurs des cultures a commencé après la deuxième guerre mondiale, débutant avec l'insecticide DDT suivi par des pesticides organochlorés (Smith et Kennedy, 2002), organophosphorés et carbamates (Philogène *et al.*, 2005). Ainsi, l'industrie chimique a eu une croissance spectaculaire pendant les années 1950 (Sparks, 2013). Cependant, le développement de la résistance aux pesticides, la résurgence des ravageurs (Croft, 1990; Philogène *et al.*, 2005; Weddle *et al.*, 2009) et l'apparition de ravageurs secondaires, suite à l'élimination de leurs ennemis naturels par ces mêmes composés (Granados, 2002; Hagen, 1973), ainsi que les effets nocifs sur l'environnement et sur la santé humaine (Ricci *et al.*, 2011) sont devenus de plus en plus manifestes. Pendant les années 1960, l'activisme public a commencé à faire pression sur la régulation et l'utilisation des pesticides aux États-Unis et en Europe, ce qui a élevé les standards environnementaux et toxicologiques d'approbation des pesticides et a encouragé le développement de pesticides « à moindre risque » pour la santé humaine et pour l'environnement (Smith et Kennedy, 2002). Le livre *Printemps Silencieux* (Silent Spring), de Rachel Carlson, lequel exposait les externalités de l'utilisation des insecticides organochlorés et organophosphorés sur la santé publique et sur l'environnement, a eu un impact énorme sur la réglementation des pesticides dans les années 1960 aux États-Unis (Epstein, 2014)

et a contribué à la création de l'Environmental Protection Agency (EPA) et à la prohibition de l'insecticide DDT (Waddell, 2000). Le développement de la résistance des ravageurs aux insecticides, a été aussi un facteur clé pour l'élaboration de produits avec de nouveaux modes d'action, car plus de 550 insectes ravageurs sont devenus résistants à un ou à plusieurs insecticides (Sparks, 2013). Une nouvelle phase dans la protection des cultures a alors commencée, alignée sur la recherche de stratégies alternatives aux pesticides de synthèse et aussi sur leur évolution (Regnault-Roger et Philogène, 2005). La lutte intégrée (IPM), est une approche de gestion des populations de ravageurs, développée au début des années 1970 (Kogan, 1998) initialement par des entomologistes comme une alternative à l'usage indiscriminé de pesticides de l'époque (Smith *et al.*, 1976). En IPM, on utilise des techniques compatibles pour maintenir les populations de nuisibles à de niveaux inférieurs à ceux causant des dommages économiquement importants. On reconnaît que les problèmes avec les ravageurs sont sous l'influence de tout l'écosystème agricole et que les traitements avec des pesticides ne sont pas nécessaires pour tous les niveaux d'abondance de ravageurs. C'est ainsi que la préservation des ennemis naturels et l'utilisation de méthodes non perturbatrices pour préserver ces agents sont essentielles (Deguine, 2008; Ehler, 2006).

Dans le cadre de l'IPM, les pesticides à large spectre et à rémanence élevée ont subi une transition vers des composés plus sélectifs et de courte activité résiduelle, sans toutefois engendrer une augmentation de pertes économiques dues aux ravageurs (Smith et Kennedy, 2002). Cependant, l'évolution des pesticides a été caractérisée par le remplacement successif d'un groupe chimique par un autre qui conduisait toujours à de nouvelles remises en cause. En effet, dans le cas des insecticides organiques de synthèse, les insecticides organophosphorés ont été introduits pour remplacer les insecticides organochlorés, ayant forte rémanence dans

l'environnement. Les organophosphorés, produits à haut risque pour la santé humaine, ont été suivis par les pyréthrinoïdes à partir de 1974 (Regnault-Roger et Philogène, 2005; Tait, 2001). Ces insecticides, qui possédaient une moindre toxicité pour l'être humain par rapport à ses prédécesseurs, ont démontré être hautement toxiques pour les environnements aquatiques (Tait, 2001). Puis, d'autres composés se sont succédé.

Au Canada, 74,3 % des pesticides vendus sont utilisés en agriculture et 77,8 % de cette proportion correspond aux herbicides, suivis par les fongicides (12,4 %) et les insecticides (4,6 %) (Santé Canada, 2014a). Au Québec, les herbicides sont aussi les pesticides les plus utilisés en milieu agricole (68,1 %), suivis par les fongicides (13,4 %) et par les insecticides (10 %). À noter que la proportion d'utilisation de ces derniers est deux fois plus grande que pour tout le Canada (Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2016).

Les pesticides d'aujourd'hui exhibent, en générale, une plus grande toxicité envers les ravageurs visés et ils requièrent des doses plus faibles. En outre, selon les fabricants, ces nouveaux pesticides sont plus sécuritaires pour les organismes non visés par rapport aux produits précédents. Mais ceci n'est pas toujours le cas, car plusieurs études ont démontré des effets directs et indirects importants. Par exemple, l'herbicide glyphosate nuit au développement et réduit la fertilité du *Chrysoperla externa* (Neur., Chrysopidae), un prédateur majeur des ravageurs du soja (Schneider *et al.*, 2009). Ce même herbicide perturbe la communauté microbienne intestinale des abeilles et augmente leur susceptibilité à des infections par des pathogènes opportunistes (Motta *et al.*, 2018). L'insecticide biologique *Bacillus thuringiensis* variété *israelensis* (Bacillales : Bacillaceae), utilisé au Québec depuis 1982, était jugé inoffensif pour les organismes non visés et pour l'environnement. Cependant, de nouvelles recherches montrent qu'il est toxique

pour des diptères de la famille Chironomidae (Theissinger *et al.*, 2018 ; Kästel *et al.*, 2017), insectes non piqueurs et proies essentielles d'autres arthropodes et des premiers états de vie des amphibiens, des oiseaux insectivores et de chiroptères (Jakob et Poulin, 2016 ; Poulin *et al.*, 2010 ; Gonsalves *et al.*, 2013 ; Junges *et al.*, 2017 ; Allgeier *et al.*, 2018).

Les propriétés souhaitables des nouveaux pesticides, c'est-à-dire, l'efficacité contre les organismes cibles à de faibles doses, une persistance courte dans l'environnement et l'innocuité envers les organismes non visés, ont incité l'apparition de plusieurs appellations commerciales qui varient de pays en pays. Par exemple, « pesticides birationnels » et « pesticides à risques réduits » entre autres (Barbosa *et al.*, 2015). Le terme pesticide à risques réduits est utilisé pour grouper principalement les produits considérés à faible impact pour la santé humaine et pour l'environnement. Parmi les insecticides auxquels l'EPA a adjugé le statut d'insecticides « à risques réduits » (IRRs), on peut citer deux insecticides néonicotinoïdes, l'acétamipride et le clothianidine (le clothianidine est considéré un IRR par l'EPA seulement dans le cas d'utilisations en serres) (EPA, 2017a). Nonobstant ce statut d'IRR en Amérique du Nord, la France a banni l'acétamipride, le clothianidine et quatre autres néonicotinoïdes en 2018 pour tout type d'utilisation (McKay, 2018 ; Samuel, 2018), afin de protéger les abeilles du syndrome de l'effondrement des colonies.

Les régulateurs de croissance des insectes (IGR), comme les benzoylurées, considérés assez sélectifs en raison de leur mode d'action (Tunaz et Uygun, 2004) ont aussi le statut d'IRR (EPA, 2017a). Bien que plusieurs insecticides soient considérés « à risques réduits », un nombre important d'études nous amènent à réévaluer leur utilisation en agriculture. En effet, il a été démontré que certains de

ces composés posent des risques importants pour les organismes bénéfiques, tels les pollinisateurs (Pitts-Singer et Barbour, 2017; Stanley *et al.*, 2016; Williams *et al.*, 2015) et les ennemis naturels des ravageurs (Amarasekare *et al.*, 2016; Beers *et al.*, 2016a; Liu et Zhang, 2012; Malagnoux *et al.*, 2015). Le risque est encore plus important si l'on considère que le service écosystémique dans le monde du contrôle biologique naturel et de la lutte biologique inoculative a été estimé à 400 billions US \$ / année (van Lenteren, 2012). Alors, on serait en train de nuire au contrôle biologique.

## I.2. LA LUTTE CHIMIQUE DANS LES VERGERS DE POMMIERS

En 2013, le Canada a produit 382 001 tonnes métriques de pommes, ce qui représente 11,74 kg/personne. Le Québec, deuxième producteur de pommes après l'Ontario, a fourni 29 % de cette production avec une superficie cultivée de 4 876 ha (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2015). En 2015, le Québec a produit à lui seul 116 391 tonnes de pommes qui ont généré des recettes de 59 967 300 \$ (Institut de la statistique du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2016). Toutefois, la pomiculture est associée à une utilisation élevée de pesticides. Les vergers reçoivent en moyenne de 11 à 15 applications de pesticides annuellement, ce qui représente une densité moyenne de 30 kg d'ingrédients actifs/ha, quantité élevée comparativement à d'autres cultures. Les fongicides sont les pesticides le plus utilisés, suivis des insecticides et des acaricides (Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2002). Certains de ces pesticides peuvent se retrouver dans les cours d'eau, dépassant les critères de qualité de l'eau visant la

protection des espèces aquatiques (Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017a). Toutefois, une des approches utilisées dans la culture de la pomme est la Production fruitière intégrée (PFI), laquelle est basée sur les mêmes principes que la lutte intégrée, mais elle prend en considération toutes les étapes de production, de l'implantation du verger jusqu'à la récolte de la production, et non pas uniquement la lutte antiparasitaire (Chouinard, 2017; Producteurs de pommes du Québec, 2017b). Le Québec compte 533 producteurs de pommes (Producteurs de pommes du Québec, 2017a), et il est estimé que 90 % d'eux optent par la PFI (G. Chouinard, communication personnelle, décembre 2017).

Une trentaine de maladies causées par des champignons et des bactéries attaquent les pommiers (Chouinard *et al.*, 2016). La tavelure du pommier, *Venturia inaequalis* (Cooke) (Pleosporales, Venturiaceae) et le feu bactérien causé par la bactérie *Erwinia amylovora* (Burril) (Enterobacterales, Enterobacteriaceae) sont les plus importants (Philion, 2016a, 2016b). La lutte contre les maladies se fait principalement avec des approches biologiques (bactéries et levures antagonistes) et chimiques. Cette dernière, comprend l'utilisation de fongicides, antibiotiques, des extraits de plantes et d'éliciteurs des mécanismes de défense de la plante (Chouinard et Philion, 2017; Philion *et al.*, 2016).

Soixante-huit ravageurs insectes et acariens attaquent les pommiers, parmi lesquels neuf sont des ravageurs primaires (Chouinard *et al.*, 2016). Pour l'année 2017, 25 matières actives étaient homologuées pour les insecticides utilisés en vergers de pommiers au Canada (Chouinard *et al.*, 2017; Chouinard et Philion, 2017). Parmi les ravageurs primaires ciblés par les insecticides, notons le carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) (Morin *et al.*, 2017). Ce dernier est un des ravageurs les plus dommageables dans les zones fruitières à travers le monde

(Barnes, 1991; Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 2011; Witzgall *et al.*, 2008). C'est aussi le ravageur le plus important au Québec, où on observe annuellement, une deuxième génération partielle dans les zones les plus chaudes (Morin *et al.*, 2017). La chenille de cet insecte creuse des galeries dans les fruits, les rendant non commercialisables. Les principaux dégâts sont faits particulièrement par la première génération pendant le mois de juillet et les dommages de la deuxième génération apparaissent en août (Boulé *et al.*, 1997; Morin *et al.*, 2017). Au Québec, cet insecte peut causer jusqu'à 40% de dégât dans les vergers non traités à la récolte (D. Cormier, communication personnelle, juin 2012). C'est pourquoi les producteurs de pommes peuvent appliquer jusqu'à trois traitements insecticides par saison (Morin *et al.*, 2017) et même sept, certaines années, dans les régions les plus affectées par ce ravageur (D. Cormier, communication personnelle, juin 2012). Ces traitements sont faits sur l'ensemble du verger, exposant le ravageur et aussi d'autres organismes présents dans les pommiers au moment des pulvérisations, ce qui peut favoriser l'apparition de ravageurs secondaires. Ces derniers sont définis comme des espèces nuisibles de moindre importance comparées aux ravageurs primaires. Le niveau des populations se situe généralement en dessous du seuil économique. Cependant, dans certaines situations les populations et donc les dommages qu'ils peuvent causer peuvent augmenter à des niveaux économiquement importants. Par exemple, après l'application d'insecticides destinés aux ravageurs primaires (Hardin *et al.*, 1995), ces produits peuvent réduire les populations des ennemis naturels des ravageurs secondaires et augmenter les populations de ces derniers (Beers *et al.*, 2016b; Croft, 1990; Dutcher, 2007; Hardman *et al.*, 2006). C'est le cas des pucerons, des ravageurs récurrents dans les vergers qui, en général, ne causent pas de pertes appréciables. Toutefois, quand ses infestations dépassent les seuils d'intervention, des insecticides, dont les néonicotinoïdes (imidaclopride, thiaclopride et acétamipride),

peuvent être appliqués (Chouinard et Phillion, 2017). Ces insecticides sont modérément toxiques pour certains prédateurs et pour l'abeille domestique (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017a). Pourtant, pour prévenir des infestations importantes de pucerons, il est fortement conseillé de favoriser la conservation et le développement des ennemis naturels (Chouinard *et al.*, 2000; Morin et Chouinard, 2015). C'est pourquoi la sélectivité des insecticides utilisés pour lutter contre les ravageurs primaires est recherchée.

### I.3. SÉLECTIVITÉ DES INSECTICIDES

La sélectivité est l'utilisation d'insecticides pour lutter contre les ravageurs phytophages sans affecter leurs ennemis naturels et d'autres espèces non ciblées (Croft, 1990). Par exemple, un pesticide à large spectre aura un effet toxique sur un grand nombre d'organismes. Au contraire, un produit sélectif aura un impact sur un groupe d'insectes ciblés ou une espèce ciblée et peu ou pas d'effets sur d'autres organismes.

Le besoin de pesticides sélectifs a été un des thèmes clés pendant l'évolution de la lutte intégrée. Dans ses débuts, la sélectivité était focalisée sur la toxicité envers les insectes versus les mammifères (Sparks, 2013). Aujourd'hui, on souhaite aussi que les insecticides soient compatibles avec les ennemis naturels des phytophages. Dans ce contexte, l'utilisation d'insecticides à risques réduits est favorisée, car ces produits sont reconnus pour être sélectifs.



#### I.4. INSECTICIDES À RISQUES RÉDUITS

En 1996, le Programme de réduction de risques des pesticides conventionnels (Conventional Reduced Risk Pesticide Program) de l'Environmental Protection Agency (EPA) a été mis en marche. Le but de ce programme était « d'accélérer la révision de pesticides conventionnels qui posent moins de risques pour la santé humaine et pour l'environnement que les alternatives conventionnelles » (EPA, 2016). Dans la même optique, en 1998, l'EPA définissait les pesticides à risques réduits, comme des produits qui possédaient au moins un des six avantages suivants par rapport aux pesticides conventionnels:

- a) Faible impact pour la santé humaine
- b) Moindre toxicité pour les organismes non visés (oiseaux, poissons et plantes)
- c) Faible potentiel de contamination des eaux souterraines
- d) Utilisation de faibles doses
- e) Faible potentiel de développement de résistance des ravageurs
- f) Compatibilité avec les pratiques d'IPM (EPA, 1998)

Cette définition, qui était assez vague, pouvait convenir à la majorité des insecticides développés et utilisés depuis 1970, même s'ils n'étaient pas sécuritaires pour les organismes non visés (Barbosa *et al.*, 2015).

En 2017, l'EPA définit trois catégories de pesticides, soient : les pesticides chimiques conventionnels, les biopesticides et les pesticides antimicrobiens. À partir de cette classification, les pesticides à risques réduits sont ceux parmi les pesticides conventionnels qui rencontrent les critères d'homologation dans le cadre du Programme de réduction de risques des pesticides conventionnels. Ces critères sont :

- a) réduire le risque pour la santé humaine<sup>1</sup>
- b) réduire le risque pour les organismes non visés<sup>2</sup>
- c) réduire le potentiel de contamination des eaux souterraines et de surface ou d'autres ressources de valeur environnementale<sup>3</sup> et
- d) élargir l'adoption des stratégies d'IPM ou augmenter la l'effectivité ou la disponibilité de ces stratégies<sup>4</sup>.

Alors, l'EPA peut adjudiquer le statut de pesticide à risque réduit si chacun de ces critères est conforme.

Au niveau fédéral, le Canada utilise les mêmes critères que l'EPA pour déterminer l'admissibilité des produits chimiques à son Programme de risques réduits (Santé Canada, 2009b) à travers « l'Initiative de l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) concernant les pesticides à risques réduits » dans le cadre de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA). Quant aux critères sur la réduction de risques pour les organismes non visés (b), cette initiative exige une faible toxicité sur l'abeille domestique. Le demandeur doit aussi présenter une

---

<sup>1</sup> Exigences d'information à fournir sur les effets potentiels pour la santé humaine : toxicité aigüe de l'ingrédient actif et des formulations, propriétés toxiques reproductives, développementales, mutagéniques et neurologiques de l'ingrédient actif. Effets oncogéniques et autres effets chroniques et subchroniques de l'ingrédient actif et toxicité de métabolites des mammifères et des plantes (EPA, 2017b).

<sup>2</sup> Exigences de l'information à fournir sur le risque pour les organismes non visés : toxicité aigüe pour les mammifères, toxicité aigüe et subaigüe pour les oiseaux, effet sur la reproduction des oiseaux, toxicité aigüe et chronique pour les poissons, toxicité pour les invertébrés aquatiques, toxicité aigüe par contact pour l'abeille domestique, effets sur la croissance des plantes terrestres et aquatiques et exposition potentielle pour les organismes non visés.

<sup>3</sup> Exigences d'information à fournir sur le potentiel de contamination des eaux et pour d'autres ressources de valeur environnementale : mobilité dans le sol et dans l'eau, transport dans l'air et bioaccumulation.

<sup>4</sup> Exigences d'information à fournir pour démontrer que le pesticide élargit l'adoption des stratégies d'IPM : discuter l'aptitude de l'ingrédient actif pour l'utilisation ou pour encourager l'adoption des programmes d'IPM. Cette discussion devrait inclure l'information sur les effets du pesticide sur les prédateurs, parasites et pathogènes pour chaque ravageur visé si cette information est disponible. Le degré de risque et/ou de la réduction d'utilisation à être obtenue par le programme d'IPM doit aussi être abordé (EPA, 2017b).

analyse raisonnée contenant des renseignements sur les effets de toxicité du pesticide sur les prédateurs, parasitoïdes et agents pathogènes naturels de chacun des organismes visés, « dans la mesure où ces renseignements sont connus » (Santé Canada, 2002). Toutefois, des antécédents de toxicité pour les prédateurs sont exigés seulement si ces derniers sont à risque d'exposition, dans le cas des matières actives de qualité technique<sup>5</sup> à être utilisés dans des cultures destinées à la consommation humaine (Santé Canada, 2009a). En conséquence, l'information sur la toxicité des composés sur les ennemis naturels n'est pas un préalable pour homologuer un pesticide et les conséquences directes et indirectes de l'utilisation de ces produits sur la plupart des organismes non visés sont inconnues.

Au Québec, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), a élaboré aussi une stratégie qui présente les grandes orientations législatives et réglementaires du Ministère, pour les prochaines années, en matière de pesticides. Toutefois, cette stratégie est centrée surtout sur l'atrazine (herbicide de la classe des triazines), le chlorpyrifos (insecticide de la famille des organophosphorées) et les insecticides considérés les plus à risque pour les pollinisateurs, soient trois insecticides néonicotinoïdes (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015). Dans la même optique, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), en collaboration avec le MDDELCC et l'Institut national de santé publique du Québec, ont élaboré un indicateur de risque des pesticides pour le Québec (IRPeQ). L'IRPeQ prend en considération un indice de risque pour la santé humaine (IRS) et un indice de risque

---

<sup>5</sup> Matière active de qualité technique : C'est le composé obtenu après la préparation de l'ingrédient actif d'un pesticide, lequel peut contenir un stabilisateur et/ou des agents antiagglomérants ou antistatiques seulement. Ainsi, l'ingrédient actif est relativement pur et peut être utilisé pour préparer les formulations des produits commerciaux des pesticides (FAO et WHO, 2008).

pour l'environnement (IRE). Ce dernier est calculé selon les propriétés des pesticides qui déterminent leur devenir et leur comportement dans l'environnement, ainsi que leur potentiel écotoxicologique, à savoir leurs effets toxiques pour plusieurs espèces animales ou végétales non ciblées. Les paramètres considérés dans la détermination de l'IRE d'un pesticide sont sa mobilité, sa persistance dans le sol, son potentiel de bioaccumulation, son impact sur les oiseaux (espèces sentinelles : canard colvert ou colin de Virginie), sur les organismes aquatiques (algues, plantes aquatiques, daphnies ou poissons) et sur les invertébrés terrestres (verres de terre et abeilles). L'IRE prend également en compte des caractéristiques d'utilisation du produit, comme la dose d'application et le type de culture (Samuel *et al.*, 2012). Ainsi, en comparant les IRSs et les IREs des insecticides à risques réduits avec ceux des insecticides conventionnels à large spectre, on remarque qu'ils sont moins nocifs (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017b). Parmi les 20 matières actives des insecticides chimiques de synthèse homologués au Canada pour lutter contre le carpocapse de la pomme, et auxquels on a attribué l'IRE, 11 possèdent l'appellation « à risques réduits », avec des IREs qui vont de 1 (thiaclopride) jusqu'à 215 (clothianidine). Cinq de ces matières actives ont un impact qualifié de minimal sur la faune auxiliaire (arthropodes bénéfiques, telles les abeilles domestiques, cécidomyies prédatrices, chrysopes, coccinelles, phytoséiides, punaises prédatrices, stigmaéides et syrphes). Le groupe d'experts en protection du pommier du Réseau-pommier du Québec recommande de privilégier ces produits en PFI (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017c). Pour privilégier un pesticide en PFI, on se base sur son impact total, estimé par la somme des deux indices, l'IRS et l'IRE, plus un indice de risque pour les espèces bénéfiques du verger (IRB). Ce dernier est calculé à partir d'une base de données qui intègre des informations concernant l'effet des produits à risques réduits sur les ennemis naturels provenant de diverses études en Amérique du Nord,

de l'Organisation internationale de lutte biologique (OILB), des données des compagnies agrochimiques, ainsi que des observations effectuées au Québec par les membres du Réseau-pommier et elles représentent la situation moyenne pour l'ensemble des vergers (Chouinard et Bellerose, 2017). Toutefois, étant donné que les pesticides à risques réduits sont des composés relativement nouveaux sur le marché, on manque encore d'informations scientifiques par rapport à leurs effets sur les ennemis naturels. Dans le cas du calcul de l'IRB, les données manquantes sont comblées en utilisant une cote moyenne de la classe des produits (acaricides, fongicides et insecticides), pour la catégorie d'insectes bénéfiques correspondante (G. Chouinard, communication personnelle, juillet 2017). Toutefois, cette information n'est pas standardisée en termes d'effet des pesticides relié à la dose, l'état de développement des ennemis naturels ou les conditions des traitements (laboratoire, terrain, période, météo, etc.).

Tel qu'exposé au début de cette section, l'appellation « à risques réduits » n'exige pas nécessairement que des informations sur les effets sur les ennemis naturels soient fournies lors du processus d'homologation. De plus, l'information recueillie par le Réseau-pommier n'est pas complète pour tous les insecticides et les ennemis naturels. En conséquence, l'évaluation de la compatibilité de ces insecticides, avec la lutte biologique naturelle, selon les pratiques courantes en pomiculture au Québec, est particulièrement pertinente. La présente thèse aborde la toxicité de deux insecticides à risques réduits, à savoir l'Altacor® (chlorantraniliprole) et le Rimon® (novaluron), sur deux aphidiphages communément présents dans les vergers, la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée. Bien que les deux IRRs, ont été homologués en 2008 au Canada contre plusieurs insectes, notamment le carpocapse de la pomme, leurs effets sur les organismes non visés n'ont pas fait l'objet de révision pour leur homologation.

En 2012, ces deux produits étaient appliqués en moyenne une fois par année dans 50 % des vergers au Québec (S. Bienvenue, communication personnelle, janvier 2013). Aujourd'hui, l'Altacor® est classifié comme un produit vert ayant un impact minimal sur la faune auxiliaire et il a une utilisation privilégiée en PFI. Le Rimon® possède une utilisation acceptable en PFI et il est considéré qu'il a un impact intermédiaire sur la faune auxiliaire (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2018). Ils sont utilisés en alternance pour lutter contre le carpocapse de la pomme, car une des stratégies pour retarder le développement de la résistance des ravageurs aux insecticides est d'alterner leurs applications en utilisant des insecticides appartenant à des groupes chimiques différents (Grafius, 2007). On vise surtout la première génération de carpocapse de la pomme, ce qui minimise les dégâts de la deuxième génération. La pratique la plus répandue consiste à faire un traitement de Rimon vers la mi-juin, suivi d'un traitement d'Altacor deux semaines et demie plus tard (Morin *et al.*, 2017). Lors de ces applications, plusieurs ennemis naturels sont présents dans le verger (Agnello *et al.*, 2000; Chouniard *et al.*, 2017). Bien que ces deux insecticides présentent de faibles risques pour la santé humaine et pour l'environnement (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec 2017b), plusieurs études ont démontré qu'ils ont divers effets sur la faune auxiliaire (Cutler *et al.*, 2006; Shearer *et al.*, 2016) et l'impact de ces produits sur la guildes<sup>6</sup> des prédateurs aphidiphages au Québec n'est pas connu.

---

<sup>6</sup> Guildes : ensemble d'organismes qui exploitent une ressource similaire, indépendamment de leur mode de nutrition, écologie ou position taxonomique (Polis *et al.*, 1989).

#### I.4.1. L'insecticide chlorantraniliprole et sa formulation commerciale Altacor® 35 WP

Le chlorantraniliprole, 3-brome-4'-chloro-1-(3-chloro-2-pyridyl)-2'-méthyle-6'-(methylcarbamoyl) pyrazole-5-carboxanilide (Fig. I.1), est un insecticide d'origine synthétique, développé par la compagnie Dupont, qui a été mis sur le marché en 2008 (Hertfordshire, 2017; Jeanguenat, 2013). Cet insecticide est à la fois ovicide et larvicide et il appartient à la classe chimique des diamides anthraniliques (groupe 28)<sup>7</sup>, (Brugger *et al.*, 2010).

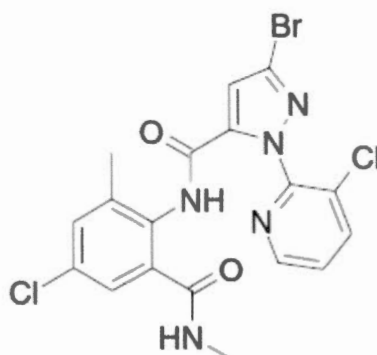


Figure I.1 Structure chimique du chlorantraniliprole, 3-brome-4'-chloro-1-(3-chloro-2-pyridyl)-2'-méthyle-6'-(methylcarbamoyl) pyrazole-5-carboxanilide (tiré du Jeanguenat, 2013).

La contraction musculaire des insectes dépend de la libération contrôlée des réserves du calcium intracellulaire. Le calcium sort du réticulum sarcoplasmique des cellules à travers des canaux modulateurs, les récepteurs de la ryanodine (RyRs) (Fig.

<sup>7</sup> Modulateurs des récepteurs ryanodines (Diamides)(IRAC, 2017).

I.2). Les insecticides appartenant au groupe des diamides anthraniliques activent les (RyRs) des insectes, ce qui stimule la libération et l'épuisement des réserves de calcium intracellulaires du réticulum sarcoplasmique des cellules des muscles, déclenchant ainsi la mort des espèces sensibles (Cordova *et al.*, 2006; Nauen, 2006). Les larves de lépidoptères ayant été exposés au chlorantraniliprole arrêtent de se nourrir et de la régurgitation, de la léthargie et de la paralysie contractile peuvent être observés précédant la mort, qui a lieu généralement de 1 à 3 jours suivant l'exposition (Lahm *et al.*, 2009).

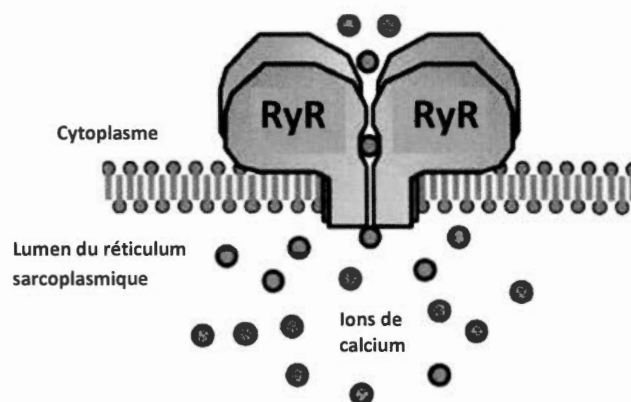


Figure I.2 Représentation schématique du récepteur de la ryanodine et de sa fonction. Le récepteur module la libération des ions du calcium provenant du réticulum sarcoplasmique vers le cytoplasme des cellules des muscles des insectes (modifié à partir de Lahm *et al.*, 2009).

Les marchés de vente principaux pour le chlorantraniliprole se trouvent en Amérique du Nord, en Europe et en Chine (Front Research, 2017). Au Canada il est actuellement homologué sous la forme de l'insecticide de qualité technique



Rynaxypyr (95.3% i.a.) pour lutter contre divers insectes ravageurs de plusieurs cultures agricoles et des gazons, et pour réprimer les termites souterrains (Santé Canada, 2009b). Cet insecticide est homologué au Canada sous divers noms. L'Altacor<sup>®</sup>, utilisé en pomiculture au Québec, le Coragen<sup>™</sup> pour usage sur plusieurs cultures maraichères en champs et en serre ainsi que pour le maïs sucré (DuPont, 2016) et le termicide Altriset<sup>™</sup>, utilisé aux États-Unis (PAN, 2000-2016). Le chlorantraniliprole est aussi utilisé comme insecticide systémique (Reding et Ranger, 2011; Schmidt-Jeffris et Nault, 2016). Quelques exemples de ce type de produit sont l'Acelepryn<sup>®</sup>, qui possède une action foliaire et systémique, conçu pour lutter contre plusieurs ravageurs du gazon et des plantes ornementales (Syngenta Canada, 2015) et le Durivo<sup>®</sup>, homologué aux États-Unis, qui en plus de contenir du chlorantraniliprole est formulé avec du thiaméthoxame, un néonicotinoïde (groupe 4A)<sup>8</sup> (PAN, 2000-2016). Le Dermacor-X-100<sup>®</sup>, est aussi un insecticide systémique utilisé principalement contre le charançon du riz aux États-Unis (Sidhu *et al.*, 2014), tout comme le Lumivia<sup>™</sup> pour enrobage de grains de maïs utilisé au Canada (DuPont, 2017). En 2015, l'échelle de ventes du chlorantraniliprole au Québec se situait entre 1 000 et 10 000 kg<sup>9</sup> (Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017b).

Le chlorantraniliprole est considéré par l'EPA, ainsi que par l'ARLA, comme un insecticide à risques réduits pour plusieurs cultures et comme termicide (EPA, 2017a).

---

<sup>8</sup> Agonisme/antagonisme des récepteurs de l'acétylcholine. Fixation sur le récepteur nicotinique de l'acétylcholine avec interruption de la transmission de l'influx nerveux (IRAC, 2017).

<sup>9</sup> Le gouvernement du Québec classe les quantités de pesticides vendus en classes. Chaque classe représente une échelle de ventes. Ainsi, les ventes annuelles des pesticides peuvent être comparées entre produits. Toutefois, l'information sur les ventes réelles de chaque composé n'est pas disponible au public. Dans le cas du chlorantraniliprole, les ventes se situent entre 1000 et 10 000 Kg pour l'année 2015, ce qui classe cet insecticide dans la classe de ventes « C ».

Des études faites sur des animaux indiquent que pour les mammifères, incluant l'homme, cet insecticide n'a pas de potentiel cancérigène. Il ne pose pas de risques pour le développement des jeunes animaux, ni de risques génotoxiques, immunotoxiques ou neurotoxiques et il n'est pas un perturbateur endocrinien (Santé Canada, 2008). Quant au risque pour l'environnement, cet insecticide possède une persistance élevée (Santé Canada, 2008). Il se biodégrade lentement dans l'eau et dans les sols. Dans l'eau, en conditions aérobies, sa demi-vie varie de 125 à 231 jours. Dans les sols, le chlorantraniliprole a une demi-vie qui varie de 228 à 924 jours, dépendamment du pH, de la température et de la lumière (EPA, 2008). Son potentiel de lessivage est aussi élevé. Il peut contaminer l'eau souterraine par lixiviation et l'eau de surface par lessivage. Ce composé est non volatil et son métabolite principal, le IN-EQW78, est immobile dans le sol. Sa toxicité sur les organismes non ciblés est faible pour les oiseaux (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017b), les bourdons et les abeilles (Dinter *et al.*, 2009). Or, le chlorantraniliprole peut compromettre le vol de certaines espèces d'abeilles sauvages en nuisant au décollage, ce qui peut affecter la recherche de nourriture et potentiellement réduire la survie des colonies (Tome *et al.*, 2015). De même, cet insecticide reste un composé à haut risque pour les invertébrés d'eau douce, car son métabolite principal, est hautement toxique pour les invertébrés aquatiques avec une concentration efficace médiane (CE<sub>50</sub>) > 0,139 ppm chez *Daphnia magna* (toxicité chronique) (EPA, 2008).

Le chlorantraniliprole affecte les insectes appartenant aux lépidoptères, diptères, coléoptères, blattidés (termitidés), et hémiptères (Lahm *et al.*, 2009), par ingestion et par contact (Bassi *et al.*, 2009). Quant aux effets du chlorantraniliprole sur les ennemis naturels, la plupart des études montrent que cet insecticide a un faible impact sur la faune auxiliaire (Tab. I.1). Cette sélectivité a été reliée aux différences

moléculaires dans les RyRs, spécifiquement dans la séquence des acides aminés de ces récepteurs, entre ordres et espèces dans un même ordre, ce qui est à l'origine des différences de sélectivité des sites d'action cible entre les groupes (Wang *et al.*, 2012). Toutefois, plusieurs de ces études ont évalué l'effet du chlorantraniliprole sur des spécimens adultes seulement, alors que cet insecticide est reconnu pour ses propriétés ovicides et larvicides.

L'Altacor® 35 WP contient 35 % de chlorantraniliprole, son ingrédient actif. Toutefois, 65 % de la formulation est composée des adjuvants (ingrédients inertes), dont la composition n'est pas spécifiée dans le label (EPA, 2009). À noter qu'il a été démontré que les adjuvants présents dans les formulations de pesticides peuvent aussi avoir des effets toxiques qui parfois dépassent ceux de l'ingrédient actif (Mesnage *et al.*, 2014).

L'Altacor a un IRS de 3 et un IRE de 91. Il est formulé en granules, ce qui forme une suspension dans l'eau pour être appliqué par pulvérisation (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017c). Au Canada cet insecticide est homologué pour être utilisé dans une grande variété de cultures : le groupe des fruits à pépins (pomme, pommette, nèfle du Japon, cenelle, poire, poire asiatique, coing), le groupe des fruits à noyau (abricot, cerise douce, cerise acide, nectarine, pêche, prune, pruneaux), le sous-groupe des mûres et framboises, des canneberges, des raisins, le groupe de noix et le sous-groupe des petits fruits de plantes naines (bleuet nain, raisin d'ours, myrtille, chicouté, canneberge et fraise) (DuPont, 2013).

Tableau I.1 Effets du chlorantraniliprole sur les ennemis naturels des ravageurs dans différentes cultures.

Espèce	Ordre	Famille	Dose (g i.a./L)	Effet	Susceptibilité	Auteurs
<i>Trichogramma chilonis</i>	Hymenoptera	Trichogrammatidae	0,05	Mortalité adultes	Aucune	Preetha <i>et al.</i> , (2009)
<i>Forficula auricularia</i>	Dermoptera	Forficulidae	0,032			Shaw et Waliis, (2010)
<i>Aphelinus mali</i> <i>Aphidius rhopalosiphi</i> <i>Trichogramma dendrolimi</i> <i>Trichogramma chilonis</i> <i>Trichogramma pretiosum</i>	Hymenoptera	Eulophidae Aphidiinae Trichogrammatidae	0,12-0,005 3,75 0,17-2,8 0,1 0,01	Mortalité et émergence d'adultes et parasitisme		Brugger <i>et al.</i> , (2010)
<i>Amblyseius swirskii</i> <i>Orius insidiosus</i> <i>Eretmocerus eremicus</i>	Acari Hemiptera Hymenoptera	Phytoseiidae Anthocoridae Aphelinidae	0,009	Mortalité adultes	Négligeable	Cradish <i>et al.</i> , (2011)
<i>Galendromus occidentalis</i>	Acari	Phytoseiidae	1,667	Mortalité de larves	Faible	Lefebvre <i>et al.</i> , (2011)
<i>Neoseiulus fallacis</i>	Acari	Phytoseiidae	0,045	Éclosion des œufs, mortalité des larves et réduction de fécondité	Aucune	Lefebvre <i>et al.</i> , (2012)
<i>Blaptostethus pallescens</i>	Hemiptera	Anthocoridae	0,045	Mortalité adultes	Négligeable	Ramos <i>et al.</i> , (2017)
<i>Anagrus nilaparvatae</i>	Hymenoptera	Mymaridae	0,034 et 0,067	Comportement des femelles : orientation, repère de l'hôte, parasitisme.	Aucune	Liu, F. <i>et al.</i> , (2012)
<i>Orius armatus</i>	Hemiptera	Anthocoridae	0,03	Mortalité de nymphes et adultes et développement de nymphes	Aucune	Broughton <i>et al.</i> , (2014)
<i>Chrysoperla carnea</i>	Neuroptera	Chrysopidae	0,018*	Survie et fécondité des adultes	Élevé	Gontijo <i>et al.</i> , (2014)
<i>Lysiphlebus testaceipes</i>	Hymenoptera	Braconidae	0,018*	Réduction de parasitisme	Élevé	Moscardini <i>et al.</i> , (2014)
<i>Orius tristicolor</i> <i>Amphiareus constrictus</i> <i>Blaptostethus pallescens</i>	Hemiptera	Anthocoridae	1,18	Mortalité adultes	Négligeable	Pereira <i>et al.</i> , (2014)
<i>Hippodamia convergens</i>	Coleoptera	Coccinellidae	0,118	-Toxicité aigüe sur larves -Taux intrinsèque de croissance	-Négligeable -Retardé	Fernandez, (2015)
			0,12	Émergence adultes après exposition des nymphes	Aucune	Lau, (2014)

\*Les insectes ont été exposés à l'insecticide par ingestion du nectar extra floral de plantes de tournesol, dont les graines avaient été traitées avec le chlorantraniliprole à 0,018 g i.a. /kg.

En général, au Québec, dépendamment de la pression du carpocapse de la pomme dans les vergers, l'Altacor est utilisé deux semaines et demie après une application de Rimon, pendant la période d'éclosion des œufs du carpocapse de la pomme (500 DJ<sub>10</sub>)<sup>10</sup> (Morin *et al.*, 2017). Il entraîne près de 80 % de mortalité des jeunes larves par exposition résiduelle, un effet qui se prolonge jusqu'à 14 jours (Cormier *et al.*, 2013). La dose recommandée correspond à la dose minimale marquée sur l'étiquette pour des pommiers de 5 mètres: 145 g/ha (Chouinard et Philion, 2017) appliqués en général dans 1000 L d'eau /ha<sup>11</sup>.

#### 1.4.2 L'insecticide novaluron et sa formulation commerciale Rimon® 10 EC

Le novaluron, 1-[chloro-4-(1,1,2-trifluoro-methoxyethoxy) phenyl]-3-(2,6-difluorobenzoyl) urée (Fig. 1.3), a été développé par Makhteshim-Agan Industries Ltd (Cutler et Scott-Dupree, 2007). Cet insecticide est un régulateur de la croissance des insectes (IGR), spécifiquement un inhibiteur de la synthèse de la chitine (CSI) appartenant au groupe chimique des benzoylurées, dont le mécanisme exact d'action biochimique n'est pas encore clair malgré de décennies de recherche intensives (Binnington et Retnakaran, 1991; Cohen, 1993; Ishaaya, Isaac et Horowitz, 1998; Zhu *et al.*, 2016). Selon l'hypothèse la plus acceptée, les benzoylphényl urées perturbent la synthèse *in vivo* et/ou le transport de protéines spécifiques nécessaires pour l'assemblage de la chitine (Oberlander et Silhacek, 1998). Des études sur le diflubenzuron, ont montré que cet insecticide modifie la composition de la chitine, ce qui affecte l'élasticité et la fermeté de l'endocuticule, empêchant la mue (Ishaaya *et al.*, 2003).

---

<sup>10</sup> DJ : degré-jours

<sup>11</sup> 1000 L/ha sont nécessaires pour un verger de pommiers standards (Morin *et al.*, 2017).

Le novaluron agit sur les stades larvaires de plusieurs insectes (Coleoptera, Hemiptera et Diptera) (Cutler et Scott-Dupree, 2007) et il est utilisé surtout pour lutter contre les lépidoptères (Pener et Dhadialla, 2012). Cet insecticide agit par ingestion et par contact et possède une activité translaminaire dans les feuilles (Ishaaya *et al.*, 2003).

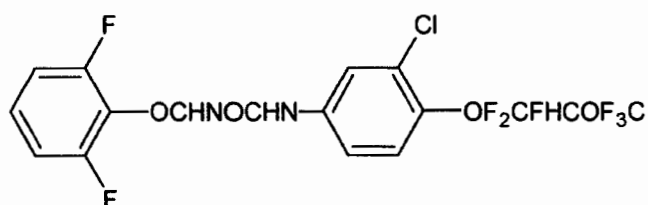


Figure I.3 Structure chimique du novaluron. 1-[3-Chloro-4-(1,1,2-trifluoro-2-trifluoro-methoxyethoxy) phenyl]-3-(2,6-difluorobenzoyl) urée (tiré de Cutler et Scott-Dupree, 2007).

Actuellement, 14 insecticides benzoylurées sont disponibles sur le marché avec une valeur annuelle de 441 millions \$US. Le novaluron est une des benzoylurées les plus largement utilisés (Zhu *et al.*, 2016). Il a été homologué dans plusieurs pays à travers l'Europe, l'Asie, l'Afrique, l'Amérique du Sud et l'Australie (FAO, 2003; Pener et Dhadialla, 2012). Aux États-Unis, trois formulations contenant le novaluron sont disponibles sur le marché : le Rimon® (0.83EC, 10% i. a.), pour utilisation dans les cultures agricoles comme les pommes, les pommes de terre, les patates douces et les brassicacées, le Pedestal® (10% i. a.) pour utilisation dans les plantes ornementales, et le Diamond® (0.83EC, 10% i. a.), utilisé pour lutter contre plusieurs insectes dans le coton (Cutler et Scott-Dupree, 2007). Au Canada, les produits commerciaux contenant du novaluron sont le Rimon® 10 EC (Adama, 2015) et

quatre formulations utilisées contre les larves de moustiques dans l'eau : Mosquiron® 0.12 CRD, Mosquiron® 0.12CRD-D, Mosquiron® 0.12P, et Mosquiron® 0.12 P-D (Santé Canada, 2014b). En 2015, l'échelle de ventes du novaluron a été de 0,1 à 1 000 kg au Québec (Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2017b).

Tout comme dans le cas du chlorantraniliprole, l'EPA et l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) considèrent que le novaluron est un insecticide à risques réduits pour l'environnement et pour les organismes non ciblés. Cet insecticide est une option envisageable pour la lutte intégrée en remplacement des composés à large spectre comme les organophosphorés, carbamates et pyréthrinoïdes (Cutler et Scott-Dupree, 2007). Quant à ses risques pour les mammifères, selon des études à long terme faites au début des années 2000 sur des rats et des souris, ce composé ne serait pas oncogène selon l'EPA (EPA, 2004). Toutefois, d'autres effets ont été observés chez ces animaux, tels l'anémie hémolytique et les effets secondaires d'agression oxydative et de réponse régénérative. Le novaluron n'est ni génotoxique ni neurotoxique et il n'y a pas d'évidence qu'il peut causer une perturbation endocrinienne (EPA, 2004). Les IRS et IRE du Rimon sont 8 et 49 respectivement (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017b). Ainsi, le Rimon a un IRE inférieur à ceux de l'Altacor. « Cet insecticide présente une toxicité aiguë et une toxicité chronique très élevées pour les invertébrés d'eau douce et les invertébrés marins, mais n'est que faiblement toxique pour les poissons, les algues et les plantes vasculaires des milieux dulcicoles et marins » (Santé Canada, 2014b). Le novaluron est peu persistant, avec une demi-vie moyenne de 10,5 j dans les sols et de 1,1 j dans l'eau. Même si ce composé a une faible toxicité chez les abeilles (DL50 supérieure à 100 µg/abeille) (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017b), il

a été démontré qu'il peut avoir des effets négatifs sur certains pollinisateurs (Hodgson *et al.*, 2011; Mommaerts *et al.*, 2006; Pitts-Singer et Barbour, 2017) et la plupart des études concluent que ce composé est toxique pour plusieurs prédateurs et parasitoïdes (Tab. I.2).

Le Rimon® 10 EC contient 10 % de novaluron et il est formulé en concentré émulsifiable. Au Canada cet insecticide est homologué pour être utilisé dans plusieurs cultures, tels les pommes, pommes de terre, fruits à noyau, poivrons, haricots à gousse comestible, fraises, légumes-tiges et légumes du genre *Brassica*, chou chinois et chou frisé, kale, mizuna, feuilles de moutarde, moutarde épinard, feuilles de navet, petits fruits, canneberges, maïs sucré, céleri, carottes et luzerne pour grains (Adama, 2015).

Au Québec, pour lutter contre le carpocapse de la pomme, on recommande la dose minimale marquée sur l'étiquette du Rimon, ce qui correspond à 0,93 L/ha pour des pommiers de 5 mètres (Chouinard et Phillion, 2017). Étant donné que la période d'exposition du carpocapse est très courte avant que les larves pénètrent dans les fruits, cet insecticide est utilisé vers la mi-juin avant la période de ponte de la première génération du carpocapse de la pomme (300 DJ<sub>10</sub>) (Morin *et al.*, 2017). Le Rimon a démontré une excellente activité résiduelle sur les œufs pondus sur feuilles et sur fruits (Cormier *et al.*, 2013).



Tableau 1.2 Effets du novaluron sur les ennemis naturels des ravageurs dans différentes cultures.

Espèce	Ordre	Famille	Dose (g i.a./L)	Effet	Susceptibilité	Auteurs
<i>Posidius maculiventris</i>	Hemiptera	Pentatomidae	0,07	Mortalité des larves, réduction de longévité, de ponte et d'éclosion des œufs.	Élevée	Cutler <i>et al.</i> , (2006)
<i>Trichogramma pretiosum</i>	Hymenoptera	Trichogrammatidae	0,04	Émergence d'adultes	Élevée dépendamment de l'hôte.	Bastos <i>et al.</i> , (2006)
			0,02		Faible	Carvalho <i>et al.</i> , (2010)
Diverses espèces	Hymenoptera	Eulophidae Braconidae Figitidae Pteromalidae	3,23	Émergence d'adultes	Élevée	Hernandez <i>et al.</i> , (2011)
<i>Neoseiulus fallacis</i>	Acari	Phytoseiidae	1,165	Mortalité des œufs et de larves et fécondité.	Élevé pour les larves	Lefebvre <i>et al.</i> , (2012)
<i>Chrysoperla externa</i>	Neuroptera	Chrysopidae	0,175 et 0,3	Nymphose et émergence d'adultes	Élevée	Zotti <i>et al.</i> , (2013)
<i>Hippodamia convergens</i>	Coleoptera	Coccinellidae	0,389	-Toxicité aigüe sur larves - Taux intrinsèque de croissance	-Modérée -Retardé	Fernandez, (2015)
<i>Hippodamia convergens</i>	Coleoptera	Coccinellidae	0,36 ml/L	Émergence des adultes après exposition des nymphes	Élevée	Lau, (2014)
<i>Coccinella septempunctata</i>	Coleoptera	Coccinellidae	0,075 ml/L	Mortalité des larves	Négligeable	Olszak et Sekrecka, (2008).

## I.5. EXPOSITION DES ENNEMIS NATURELS AUX INSECTICIDES

Les arthropodes absorbent une dose d'insecticide par contact initial suivi du transfert du produit toxique vers le ou les sites d'action dans leurs corps. Les types de contact initial avec le pesticide ou voie d'exposition sont :

a) Contact topique : Il se produit rapidement après l'application de l'insecticide par contact direct avec des gouttelettes, par interception de gouttelettes aériennes pendant le vol, par exposition aux vapeurs du pesticide ou par trempage au sol, avec un pesticide soluble.

b) Voie orale (ingestion) : fait référence à l'ingestion d'eau, plantes, parties de plantes (nectar, pollen, etc.), miellat, hôtes ou proies contaminés par un insecticide.

c) Contact résiduel : c'est le contact avec de résidus de pesticides déposés sur les plantes et autres substrats. Il s'agit de la voie d'exposition la plus courante (Croft, 1990; Fernandez, 2015).

Étant donné que les ennemis naturels peuvent être exposés aux insecticides par ces trois voies d'exposition, les études en laboratoire évaluent les effets des produits en prenant en considération la biologie et l'écologie des arthropodes bénéfiques. Par exemple, si dans une culture donnée, la période d'éclosion des œufs d'un insecte a lieu juste après l'application d'un insecticide, on serait intéressé surtout à évaluer l'effet résiduel de ce composé sur les larves de l'espèce en question. Au Québec, dans les vergers de pommiers, plusieurs ennemis naturels sont présents pendant la période des traitements insecticides dirigés contre le carpocapse de la pomme (Tab. I.3), ce qui pose un risque important pour ces organismes.

Tableau I.3. Calendrier de la présence de quelques membres de la guildes des aphidiphages et des applications d'insecticides contre le carpocapse de la pomme dans les vergers de pommiers au Québec. Modifié à partir du Chouinard et Morin (2015).

Aphidiphages	Stades de développement des ennemis naturels	Stade de développement du pommier (approximatif)						
		Floraison (Mai)	Calice (Juin)	Nouaison	Juin	Formation pomme (Juillet)	Mûrissement pomme	Cueillette (Sept.)
Cécidomyie prédatrice <i>Aphidoletes aphidimyza</i> (Diptera : Cecidomyiidae)	Larves			X	X	X	X	
Chrysopes <i>Chrysoperla sp.</i> (Neuroptera : Chrysopidae)	Larves et adultes	X	X	X	X	X	X	X
Syrphes <i>Eupeodes americanus</i> (Diptera : Syrphidae)	Larves	X	X	X	X			
Coccinelles <i>Harmonia axyridis</i> <i>Coleomegilla maculata</i> (Coleoptera : Coccinellidae)	Larves et adultes	X	X	X	X	X	X	X
Punaise de la molène <i>Campylomma verbasci</i> (Hemiptera : Miridae)	Larves et adultes	X	X	X	X	X	X	X

Rimon® 10 EC      Altacor® 35 WP

## I.6. IMPACT DES INSECTICIDES SUR LES ENNEMIS NATURELS ET SUR LA LUTTE BIOLOGIQUE

Suite à son absorption après exposition, les pesticides peuvent avoir un effet létal ou des effets sublétaux sur les organismes. L'effet létal fait référence à la mortalité causée par un pesticide. Quant aux effets sublétaux, il s'agit des effets sur des spécimens qui survivent à une exposition d'un pesticide (Desneux *et al.*, 2007). Les effets sublétaux peuvent se manifester au niveau physiologique (taux de développement, malformation des organes, taille des individus, longévité, fécondité, rapport des sexes), ou comportemental (mobilité, comportement d'alimentation, comportement de ponte, performance de l'apprentissage) (Hardin *et al.*, 1995). L'effet létal et les effets sublétaux dépendent principalement de la dose<sup>12</sup>, de la toxicité du pesticide et de la sensibilité de chaque espèce au pesticide (Croft, 1990). D'autres facteurs déterminent aussi les effets d'un pesticide sur les ennemis naturels, tels le mode d'action du produit, la persistance et la voie d'exposition (Talebi *et al.*, 2008). Les pesticides perturbent les interactions ennemies naturels/proies-hôtes de trois façons : a) en altérant les densités populationnelles des ennemis naturels et de leurs proies-hôtes, ce qui est le résultat d'effets létaux et sublétaux (Cloyd, 2012; Desneux *et al.*, 2007); b) par famine-émigration des ennemis naturels suite à l'élimination des proies et/ou ; c) par changement de la synchronie spatiale et temporelle entre les ennemis naturels et leurs proies-hôtes (Croft, 1990). Hardin et ses collègues (1995) divisent l'impact des insecticides sur les ennemis naturels en des impacts directs et indirects. Les impacts directs font référence aux effets des pesticides sur la mortalité, sur les changements

---

<sup>12</sup> La dose sublétales est la dose que ne cause pas une mortalité apparente sur la population expérimentale (Desneux *et al.*, 2007).

physiologiques, reproduction ou comportement des ennemis naturels. Les effets indirects interfèrent avec la performance des ennemis naturels par altération de la qualité des proies/hôtes, par famine après l'élimination de proies/hôtes principales et alternatives, par contamination des ressources de nutrition complémentaires ou par répulsion dû à la proie (Hardin *et al.*, 1995). La figure I.4 illustre comment ces impacts peuvent affecter la lutte biologique naturelle des ravageurs.

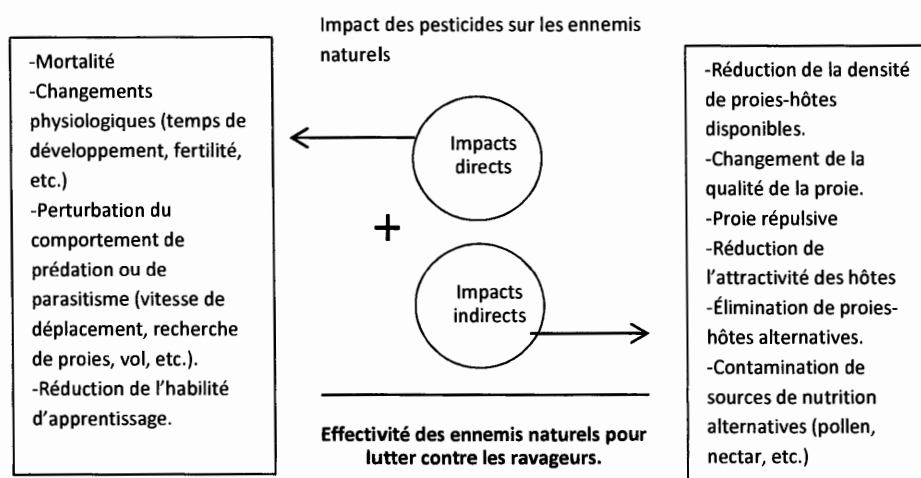


Figure I.4 Conséquences possibles des pesticides sur l'efficacité des ennemis naturels à lutter contre les ravageurs (adapté d'Hardin *et al.*, 1995).

## I.7. GUILDE APHIDIPHAGE DANS LES VERGERS DE POMMIERS

Dans les vergers de pommiers, une culture pérenne, les arbres sont entretenus pour les garder vigoureux au moyen de la fertilisation, de la taille, de la lutte aux mauvaises herbes et par l'irrigation. Si ces interventions sont excessives, elles favorisent les populations de pucerons, car elles procurent les ressources nécessaires à leur établissement et leur développement. Dans cet environnement, les guildes d'ennemis naturels peuvent évoluer vers des communautés matures bien établies (Brown, 2004). Les espèces de pucerons présents dans les vergers du Québec sont le puceron lanigère, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann), le puceron rose, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), le puceron de la spirée, *Aphis spiraeicola* Patch et le puceron vert du pommier, *Aphis pomi* De Geer, (Hemiptera : Aphididae) (Morin et Chouinard, 2015). Lorsque leurs populations sont abondantes, les branches des pommiers deviennent plus susceptibles au gel hivernal, la croissance des pousses peut être retardée et le feuillage et les fruits sont enduits d'un miellat sur lequel se développe un champignon noir (fumagine). La fumagine nuit à la récolte et peut aussi affecter la croissance de jeunes pommiers. Le puceron rose provoque des déformations aux fruits et le puceron lanigère affecte les racines et les tiges formant des nodules qui favorisent l'entrée de maladies (Chouinard, 1997; Fréchette *et al.*, 2008; Morin et Chouinard, 2015). Les pertes en productivité des arbres dû au puceron lanigère peuvent atteindre 465 US\$/ha (Brown *et al.*, 1995). De plus, les pucerons transmettent des maladies virales et propagent le feu bactérien, une maladie sporadique majeure au Québec qui peut détruire un verger en une saison (Phillion, 2016b).

Comme il a été déjà mentionné, les ennemis naturels des pucerons sont indispensables pour prévenir des infestations importantes (Chouinard *et al.*, 2000).

Dans le sud-ouest du Québec, le complexe des ennemis naturels des pucerons en pommeraie compte environ 58 espèces de prédateurs et de parasitoïdes appartenant à 10 familles (Tourneur *et al.*, 1991). Entre les prédateurs qu'on trouve dans les vergers, on compte la mouche *Leucopis annulipes* Zetterstedt (Diptera: Chamaemyiidae), la cécidomyie prédatrice, *Aphidoletes aphidimyza* (Rond.) (Diptera : Cecidomyiidae), des syrphes, tels *Eupeodes americanus* Wiedemann (Diptera : Syrphidae), des chrysopes, *Chrysoperla* spp. (Neuroptera : Chrysopidae), la punaise de la molène, *Campylomma verbasci* (Meyer) (Hemiptera : Miridae), un insecte zoophytophage, et des coccinelles (Chouniard *et al.*, 2017; Fréchette *et al.*, 2008a; Fréchette, Larouche et Lucas, 2008).

#### I.7.1. Assemblage de coccinelles

Les coccinelles constituent un groupe important dans les chaînes trophiques, regroupant des espèces phytophages, mycophages et prédatrices. Elles sont surtout reconnues comme d'importants ennemis naturels des ravageurs suceurs (pucerons, coccidés, aleurodes et psylles), un des groupes d'insectes les plus dommageables aux cultures (Hodek *et al.*, 2012). D'ailleurs certaines espèces de coccinelles sont commercialisées comme agents de lutte biologique (Roy *et al.*, 2016). Par exemple, au Québec, la coccinelle convergente, *Hippodamia convergens* Guérin-Ménéville, est commercialisée par Anatis Bioprotection (Anatis Bioprotection, 2017) et la coccinelle à deux points, *Adalia bipunctata* L. est vendue par Biobest (Biobest, 2017).

Au Québec, il a été estimé qu'il existe près de 80 espèces de coccinelles (Bousquet *et al.*, 2013) et plusieurs sont présentes dans les vergers de pommiers, telles la coccinelle maculée, *Coleomegilla maculata* De Geer, la coccinelle à trois bandes,

*Coccinella trifasciata* L., la coccinelle convergente, *H. convergens*, la coccinelle à deux points, *A. bipunctata* et la coccinelle à quatorze points, *Propylea quatuordecimpunctata* (L.) (Agnello *et al.*, 2000; Fréchette *et al.*, 2008). Bien que ces espèces et d'autres aient été repérées dans les vergers, au cours des dernières années on observe surtout la coccinelle à sept points, *Coccinella septempunctata* L. et la coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* Pallas, deux coccinelles envahissantes (Elliott *et al.*, 1996; Lucas *et al.*, 2004; Roy et Wajnberg, 2008 ; Chouinard, 2016).

#### 1.7.1.1. La coccinelle maculée, *Coleomegilla maculata*

La coccinelle maculée, *Coleomegilla maculata* (DeGeer), est une espèce néarctique prédatrice (Hodek et Honěk, 1996) présente en Amérique du Nord et en Amérique du Sud (Lucas *et al.*, 2002). Elle appartient à la sous-famille Coccinellinae, qui comprend une importante variété d'espèces, et à la tribu Tytthaspidini (Tab. 1.4) (Hodek *et al.*, 2012). Cette coccinelle est de couleur rose ou rouge vif, elle possède 12 points noirs apparents et mesure de 5 à 7 mm de longueur et la forme de son corps est allongée (Larochelle, 1979). On observe quatre stades larvaires. Toutefois il peut avoir jusqu'à cinq stades dans de conditions de laboratoire (Labrie, 2007; Warreen et Tadic, 1967). Le temps de développement post embryonnaire est en moyenne 20 jours pour une température de 24°C (Morales-Ramos et Rojas, 2017).



Tableau I.4 Taxonomie de la coccinelle maculée (Hodek *et al.*, 2012)

Ordre	Coleoptera
Sous-Ordre	Polyphaga
Super-famille	Cucujoidea
Famille	Coccinellidae Latreille, 1807
Sous-famille	Coccinellinae Latreille, 1807
Tribu	Tytthaspidini Crotch, 1874
Genre	<i>Coleomegilla</i> Timberlake, 1920
Espèce	<i>Coleomegilla maculata</i> (DeGeer)

Malgré la dominance de certaines espèces exotiques, *C. maculata* est très présente dans les écosystèmes agricoles au Québec (Étilé, 2013; Lucas *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2007), ainsi que dans d'autres régions (Long et Finke, 2014; Murillo, 2014; Prescott et Andow, 2016; Tillman et Cottrell, 2012). Il s'agit d'une espèce largement polyphage (Hodek et Evans, 2012) qui se nourrit de proies diverses, certaines d'entre elles étant des ravageurs clés. Par exemple, *C. maculata* est un prédateur majeur des œufs du doryphore de la pomme, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Alyokhin, 2009; Hilbeck et Kennedy, 1996). La pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis* (Hübner) (Lep., Pyralidae) (Musser et Shelton, 2003) et le puceron du maïs, *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (Lundgren et Wiedenmann, 2005) dans le maïs sucré et le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* (Sulzer), dans la pomme de terre (Mack et Smilowitz, 1982), ainsi que des acariens (Allen, 2015), font aussi partie de ses proies. Le pollen, ainsi que d'autres parties végétales, comme du nectar extrafloral, sont consommés par de cette coccinelle (Lixa *et al.*, 2010; Lundgren *et al.*, 2004; Lundgren et Seagraves, 2011).

### I.7.1.2. La coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis*

*Harmonia axyridis* appartient à la sous-famille Coccinellinae et la tribu Coccinellini (Tab. I.5). Elle a un corps convexe et ovale, relativement plus large par rapport à d'autres espèces (Soares *et al.*, 2008). La coloration des élytres peut varier (polymorphisme) d'orange à rouge avec de 0 à 12 points noirs ou peut être noir avec des points rouges (Koch, 2003). En général, il y a 4 stades larvaires, mais il peut avoir jusqu'à 5 (Nedvěd et Honek, 2012). Son cycle de développement (œuf-adulte) est en moyenne de 18 jours à 26°C (Lamana et Miller, 1998).

Tableau I.5. Taxonomie de la coccinelle asiatique (Hodek *et al.*, 2012)

Ordre	Coleoptera
Sous-Ordre	Polyphaga
Super-famille	Cucujoidea
Famille	Coccinellidae Latreille, 1807
Sous-famille	Coccinellinae Latreille, 1807
Tribu	Coccinellini Latreille, 1807
Genre	<i>Harmonia</i> Mulsant, 1850
Espèce	<i>Harmonia axyridis</i> Pallas

### I.7.2. La coccinelle asiatique en tant qu'envahisseur

Plusieurs définitions ont été proposées pour la notion « d'invasion biologique » (Davis et Thompson, 2000; Inderjit, 2005; Vermeij, 1996). Toutefois, la définition proposée par Valéry *et al.* (2008) est compatible avec la plupart des idées

existantes : « Une invasion biologique comprend une espèce qui acquiert un avantage compétitif après la disparition des obstacles naturels à sa prolifération, lequel lui permet de se propager rapidement et de conquérir de nouvelles régions dans les écosystèmes d'arrivée, dans lesquels cette espèce devient l'une des populations dominantes ». Le phénomène des invasions biologiques est une des causes les plus importantes du déclin de la biodiversité dans les écosystèmes (Gardiner *et al.*, 2009). Les espèces envahissantes peuvent perturber plusieurs processus écologiques et évolutifs (Mooney et Cleland, 2001), tels des changements dans la diversité et dans la structure des communautés (Strayer *et al.*, 2006), ce qui affecte les services écosystémiques et peut causer de pertes économiques considérables (Vilà *et al.*, 2010; Walsh *et al.*, 2016). L'invasion d'une espèce dans un nouveau territoire, en dehors de sa région d'origine est caractérisée par 4 périodes : 1) introduction de l'espèce dans le nouveau territoire, 2) colonisation initiale de nouveaux habitats, 3) établissement d'une population autosuffisante et 4) poursuite de l'expansion de l'espèce envahissante vers d'autres territoires (Sakai *et al.*, 2001; Snyder et Evans, 2006).

L'intensification du commerce et de l'activité humaine à travers le monde, a augmenté le déplacement des espèces en dehors leur région d'origine (Mack *et al.*, 2000). Ainsi, depuis 1890, 179 espèces de coccinelles ont été introduites aux États-Unis et Canada et 27 s'y sont établis (Honek, 2012). La coccinelle à sept points, *Coccinella septempunctata* (L), et la coccinelle asiatique sont les deux coccinelles le plus envahissantes en Amérique du Nord. (Michaud, 2012). Toutefois, *H. axyridis* est considérée comme une des espèces les plus envahissantes à travers le monde (Adriaens *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2011; Facon *et al.*, 2011; Grez *et al.*, 2010; Michaud, 2002b; Roy *et al.*, 2006; Roy et Wajnberg, 2008; Stals et Prinsloo, 2007). Son succès à s'établir dans de nouveaux écosystèmes, est le résultat de la

compétition avec les espèces indigènes (Lucas *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 2016), sa grande capacité reproductive (Michaud, 2002a) et son rôle comme prédateur intragilde (Cottrell et Yeorgan, 1998; Lucas, 2012; Pell *et al.*, 2008). Les premiers spécimens de *H. axyridis* à avoir été repérés au Canada ont été récoltés en 1994 dans un verger de pommiers à Frelighsburg au Québec (Coderre *et al.*, 1995). En 2000, la coccinelle asiatique était abondante dans les vignobles, le maïs, les poivrons et la culture du soya (Lucas *et al.*, 2007).

La coccinelle asiatique, se nourrit d'une variété de proies. Principalement, de nombreuses espèces de pucerons (Hodek et Evans, 2012) et aussi des acariens (Lucas *et al.*, 1997), des psylles, d'autres coléoptères, comme des chrysomèles et des charançons et des lépidoptères (Koch, 2003). Elle consomme aussi des matières végétales, comme du pollen (Berkvens *et al.*, 2008; Lundgren *et al.*, 2004) et différentes sortes de fruits à la fin de l'été (Koch *et al.*, 2004; Moser *et al.*, 2008). Cette coccinelle peut aussi se nourrir d'autres prédateurs aphidiphages (Nedvěd *et al.*, 2010), ainsi que d'autres espèces de coccinelles, comportement qui a été considéré comme une clef du succès de ses invasions à travers le monde (Snyder et Evans, 2006) (Voir section sur la prédation intragilde). Par exemple, il a été démontré que *H. axyridis* peut compléter son cycle de développement en se nourrissant exclusivement d'œufs de *C. maculata*. D'ailleurs, *H. axyridis* est capable de détoxifier les alcaloïdes contenus dans ses proies intragildes (Sloggett et Davis, 2010).

La coccinelle maculée et la coccinelle asiatique sont des prédateurs généralistes. Toutefois, il existe des différences quant à leur alimentation. D'ailleurs, quand l'ingestion de matériaux végétaux a été comparée entre la coccinelle maculée et la coccinelle asiatique, la première a démontré être plus pollinivore que la deuxième (Lundgren *et al.*, 2004). En fait *C. maculata* peut compléter son développement

exclusivement sur une diète à base du pollen de certaines plantes sans différences significatives par rapport à une diète de pucerons en poudre (Smith, 1960). Dans le cas de la coccinelle asiatique, 35-48 % des larves sont devenues adultes quand elles ont été élevées sur pollen, comparé à 90-98 % des larves qui ont consommé une diète d'œufs de pyrale ou œufs et pollen (Berkvens *et al.*, 2008). Dans une autre étude il a été démontré que la fréquence d'alimentation de jeunes plantes de maïs par *C. maculata* est plus grande que celle de *H. axyridis* (Moser *et al.*, 2008). Ces exemples indiquent que la coccinelle maculée pourrait avoir une bonne capacité à tolérer certains métabolites secondaires de plantes, suggérant aussi une meilleure capacité de détoxification par rapport à d'autres coccinelles, dont les habitudes alimentaires comportent moins de variété végétale.

#### I.8. PREDATION INTRAGUILDE

Une guilda est l'ensemble d'organismes qui exploitent une ressource similaire, indépendamment de leur mode de nutrition, écologie ou position taxonomique (Polis *et al.*, 1989). La prédation intragilde (IGP) est une interaction écologique entre compétiteurs potentiels, car elle se produit quand un des membres d'une guilda tue et/ou dévore un autre membre de la même guilda (Polis et Holt, 1992). Ce comportement est répandu dans la nature et combine deux forces importantes dans la structuration des communautés écologiques: la compétition et la prédation (Polis et Holt, 1992). Ainsi, l'IGP peut avoir de conséquences importantes pour la dynamique des populations (Polis *et al.*, 1989), la lutte biologique (Rosenheim *et al.*, 1995), la conservation des espèces (Müller et Brodeur, 2002) et encore pour les invasions biologiques (Michaud, 2012; Snyder *et al.*, 2004).

L'IGP confère des avantages à la valeur adaptative du prédateur intraguilde, tels, l'élimination de compétiteurs, l'élimination de potentiels prédateurs et elle fournit de l'énergie et de la nutrition face à de faibles densités de proies extra guildes. En conséquence, l'IGP peut augmenter la survie, la croissance et la reproduction des individus (Polis *et al.*, 1989).

Pour déterminer l'IGP, on définit l'agresseur, comme le prédateur intraguilde, la victime, comme la proie intraguilde et la ressource qu'ils partagent, la proie extra guilde (Lucas *et al.*, 1998). L'IGP, est caractérisée par l'intensité (nombre d'évènements d'IGP dans une combinaison de prédateurs spécifiques), par la direction (identité du prédateur et de la proie dans l'interaction) et par la symétrie (quand l'interaction est mutuelle entre deux prédateurs, la symétrie indique quel prédateur est plus souvent la proie ou le prédateur intraguilde) (Lucas, 2005). L'intensité et la direction sont déterminées par la spécificité alimentaire et la taille du prédateur, sa voracité, la mobilité de la proie et du prédateur, et les mécanismes de défense de la proie (Holt et Polis, 1997; Lucas *et al.*, 1998; Polis *et al.*, 1989). L'IGP est aussi déterminée par l'hétérogénéité spatiale de l'habitat (laquelle influence la fréquence des rencontres entre les prédateurs), la densité de la proie extra-guilde, la présence de proies alternatives et aussi la période d'activité et le patron de recherche de proies des prédateurs (Lucas *et al.*, 1998).

Quant aux substances toxiques impliquées dans l'IGP, les alcaloïdes présents dans les proies intraguildes ont été particulièrement étudiés. Par exemple, ces composés ont été investigués en tant que méthode pour vérifier l'IGP exercé par *H. axyridis* sur d'autres coccinelles sur le terrain (Hautier *et al.*, 2008; Hautier *et al.*, 2011) et comme protection chimique des œufs contre la prédation (Hemptinne *et al.*, 2000; Pervez et Gupta, 2004; Rieder *et al.*, 2008; Ware *et al.*, 2008). Il a été démontré que même si le fait de se nourrir sur des proies (œufs hétérospécifiques) toxiques, qui

peuvent causer de la mortalité ou augmenter le temps de développement du prédateur intraguilde, l'IGP peut toujours augmenter la survie. De cette façon, les avantages de l'IGP pour le prédateur dépassent ses coûts (Hemptinne *et al.*, 2000).

Dans les cas des prédateurs des ravageurs des cultures, il faut prendre en considération que la plupart des systèmes agricoles sont soumis à des traitements chimiques, parfois intensifs et que ces arthropodes peuvent être exposés à un ou à plusieurs pesticides. C'est pourquoi certains des facteurs qui déterminent l'IGP peuvent être affectés par les insecticides. Toutefois, il existe deux études qui ont exploré directement ce sujet. Dans une de ces études, il a été démontré qu'une dose sub létale de l'insecticide lambda-cyhalothrine, lequel perturbe le système nerveux des insectes, cause une mortalité importante des deux prédateurs intraguildes couramment présents en vergers de pommiers. Cette mortalité est le résultat d'une deuxième exposition à l'insecticide par ingestion des proies intraguildes contaminées : *H. axyridis* a été exposé à l'insecticide lors de l'ingestion de *Hyaliodes vitripennis* (Say) (Hemiptera : Miridae) et ce dernier a aussi été exposé à l'insecticide après ingestion d'*Amblyseius fallacis* (Garman) (Acari : Phytoseiidae) (Provost *et al.*, 2003a). Dans la deuxième étude, après IGP sur proies intraguildes contaminées avec le même insecticide, la mobilité d'*A. fallacis* et de son prédateur *H. vitripennis* a augmenté, ce qui a favorisé les rencontres entre prédateurs et proies intraguildes et un niveau d'IGP plus élevé qu'en absence du composé. De plus, le lambda-cyhalothrine a eu un effet « Knockdown » sur les larves de *H. vitripennis* et sur les larves de *H. axyridis*, ce qui réduit l'activité des prédateurs (Provost *et al.*, 2003b). Ces recherches montrent qu'un insecticide neurotoxique peut affecter l'IGP. Étant donné que ce comportement se manifeste dans la plupart des systèmes aphidiphages et qu'il serait un facteur de mortalité important pour certains prédateurs (Gagnon *et al.*, 2011; Lucas, 2005), il est pertinent d'explorer l'effet des

insecticides avec des modes d'action distincts sur l'IGP et particulièrement, en considérant la coccinelle asiatique, un super prédateur pour plusieurs experts.

### I.9. LA COCCINELLE ASIATIQUE COMME SUPER PRÉDATEUR ?

Bien que la coccinelle asiatique ait été utilisée dans des programmes de lutte biologique partout dans le monde (Koch et Galvan, 2008), elle pose aussi un risque considérable à la diversité des ennemis naturels de la guildes des aphidiphages et à leurs services écosystémiques, ainsi qu'à la biodiversité dans un sens plus large. Pour plusieurs chercheurs ce phénomène se produit en raison de son rôle comme super prédateur, dominant les guildes aphidiphages et cocciphages (Hautier *et al.*, 2008; Pell *et al.*, 2008). En effet, plusieurs études en laboratoire ont démontré que la coccinelle asiatique domine les confrontations avec d'autres coccinelles. Par exemple, quand elle est confrontée à la coccinelle maculée, *H. axyridis* est pour la plupart du temps le prédateur intragilde et le cannibalisme est beaucoup plus important chez cette espèce que chez *C. maculata* (Tab. I.6) (Cottrell et Yeorgan, 1998). Ainsi, un super prédateur devrait avoir une bonne capacité pour tolérer des composés chimiques défensifs (Lucas, 2012). Par exemple, *H. axyridis* a une meilleure aptitude pour tolérer des alcaloïdes provenant des œufs de conspécifiques et d'hétérosécifiques que *C. septempunctata* (Kajita *et al.*, 2010). Cette dominance, en tant que prédateur intragilde, est aussi expliquée par sa grande taille, ses épines larvaires (Lucas, 2012), son développement larvaire rapide (Labrie *et al.*, 2006), son importante adaptabilité nutritionnelle (Koch, 2003) et sa considérable agressivité (Labrie *et al.*, 2006; Snyder et Evans, 2006). De plus, la coccinelle asiatique contient



des composés toxiques qui la rendent répulsive et toxique pour plusieurs prédateurs potentiels (Nedvěd *et al.*, 2010).

Cependant, certains experts ne sont pas d'accord avec le statut de super prédateur pour *H. axyridis*, car un super prédateur est une espèce qui se trouve au sommet de la chaîne alimentaire et qui devrait donc être libre de pression de prédation (Rosenheim, 1998). Ce qui n'est pas le cas pour cette espèce, car il a été démontré qu'elle peut être la proie intragilde d'autres coccinelles (Gagnon *et al.*, 2011). La chrysope, *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera : Chrysopidae) peut être aussi un prédateur intragilde supérieur à *H. axyridis*, même si cet insecte est de moindre taille (Nedvěd *et al.*, 2010). Alors, *H. axyridis* pourrait être seulement un prédateur généraliste invasif comme d'autres espèces (Soares *et al.*, 2008). De plus, pour certains, l'IGP ne détermine pas la dominance des prédateurs, car ce comportement n'a pas obligatoirement un impact significatif sur l'abondance des coccinelles (Lucas, 2012).

#### I.10. INTERACTIONS ENTRE *C. MACULATA* ET *H. AXYRIDIS*

*Coleomegilla maculata* et *H. axyridis* ont été répertoriés en même temps dans plusieurs écosystèmes naturels et agricoles (Fréchette *et al.*, 2008; Lucas *et al.*, 2002; Lundgren *et al.*, 2004) et l'IGP entre ces deux prédateurs se produit naturellement (Gagnon *et al.*, 2011). De plus, les deux coccinelles sont exposées aux mêmes insecticides, ce qui veut dire que ces composés pourraient avoir un effet létal et des effets sublétaux sur chaque espèce et aussi sur l'IGP entre les deux.

Dans des conditions expérimentales contrôlées, il a été démontré que l'IGP entre la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée est asymétrique en faveur de la première (Tab. I.6) (Cottrell et Yeargan, 1998; Labrie *et al.*, 2014). Toutefois, si les insecticides affectent les deux espèces différemment, est-ce que la dominance de la coccinelle asiatique, en tant que prédateur intragilde sera préservée ? Distincts scénarios peuvent être envisagés. Par exemple, le chlorantraniliprole et le novaluron pourraient avoir un effet létal important chez les deux prédateurs ou ces derniers peuvent avoir des susceptibilités différentes aux deux composés. En conséquence, les deux insecticides pourraient perturber la dynamique populationnelle des coccinelles dans certaines cultures avec des impacts sur la diversité fonctionnelle en termes de lutte biologique naturelle. Alors, l'évaluation des susceptibilités particulières de chacune des espèces à ces composés, ainsi que les effets des insecticides sur la prédation intragilde entre les deux espèces, sont nécessaires, car si une des coccinelles est plus affectée que l'autre ou si les deux sont également affectées, leurs comportements et/ou les conséquences des comportements peuvent avoir des impacts importants sur leurs populations.

Dans la littérature, on peut trouver de l'information sur l'effet du chlorantraniliprole et du novaluron sur certaines espèces de coccinelles, toutefois on ne trouve pas suffisamment d'études qui explorent particulièrement l'effet de ces deux insecticides sur la coccinelle maculée et/ou la coccinelle asiatique. Un survol de la littérature sur les effets de ces deux composés sur les coccinelles est présenté dans la section suivante.

Tableau I.6. Étude de laboratoire de prédation et cannibalisme par *H. axyridis* et *C. maculata* (Cottrell et Yeorgan, 1998).

Combinaisons	Durée	Résultats
L <sub>2</sub> <i>H. axyridis</i> vs L <sub>2</sub> <i>C. maculata</i>	24 h	86,7 % prédation sur <i>C. maculata</i> 0,0 % prédation sur <i>H. axyridis</i>
L <sub>4</sub> <i>H. axyridis</i> vs L <sub>4</sub> <i>C. maculata</i>	24 h	94,3 % prédation sur <i>C. maculata</i> 0,0 % prédation sur <i>H. axyridis</i>
L <sub>1</sub> <i>H. axyridis</i> vs L <sub>3</sub> <i>C. maculata</i>	24 h	0,0 % prédation sur <i>C. maculata</i> 68,6 % prédation sur <i>H. axyridis</i>
L <sub>3</sub> <i>H. axyridis</i> vs L <sub>4</sub> <i>C. maculata</i>	24 h	16,1 % prédation sur <i>C. maculata</i> 3,2 % prédation sur <i>H. axyridis</i>
	96 h	93,1 % prédation sur <i>C. maculata</i> 6,9 % prédation sur <i>H. axyridis</i>
L <sub>4</sub> <i>C. maculata</i> vs L <sub>4</sub> <i>C. maculata</i>	24 h	5 % cannibalisme
L <sub>4</sub> <i>H. axyridis</i> vs L <sub>4</sub> <i>H. axyridis</i>	24 h	33,3 % cannibalisme

Stades larvaires : L<sub>1</sub>, premier stade ; L<sub>2</sub>, deuxième stade ; L<sub>3</sub>, troisième stade ; L<sub>4</sub>, quatrième stade.

#### I.11. SUSCEPTIBILITÉ DES COCCINELLES AU CHLORANTRANILIPROLE ET AU NOVALURON

Il existe plusieurs études qui explorent l'effet des insecticides utilisés dans les systèmes agricoles sur la coccinelle asiatique, surtout des insecticides perturbateurs neuromusculaires, tels des organophosphorés, organochlorés et néonicotinoïdes (Cho *et al.*, 1997; Galvan *et al.*, 2006; James, 2003; Kraiss et Cullen, 2008; Michaud, 2002b). La susceptibilité de la coccinelle maculée aux insecticides a aussi été étudiée dans le contexte de composés à large spectre, notamment les néonicotinoïdes et les IGRs, (Head *et al.*, 1977; Hilbeck et Kennedy, 1996; Lucas *et al.*, 2004; Roger *et al.*, 1995; Smith et Krischik, 1999; Trisyono *et al.*, 2000). Quant au chlorantraniliprole et au novaluron, quelques études ont été faites pendant les dernières années sur des

coccinelles d'importance en l'agriculture et font référence à l'effet létal et aux effets sublétaux de ces produits.

Fernandez (2015) a étudié l'effet du chlorantraniliprole et du novaluron sur *H. convergens*, un important prédateur dans les vergers de pommiers de l'ouest des États-Unis. Les larves et les femelles adultes ont été traitées simultanément par voie topique, orale et résiduelle à la dose maximale recommandée pour les deux insecticides. Le chlorantraniliprole et le novaluron ont causé des taux de mortalités supérieures à 69 % et le chlorantraniliprole a été toxique pour les adultes (moins de 40 % de survie). Quant aux effets sublétaux sur la reproduction, le novaluron a réduit l'éclosion des œufs de 86 % et la fertilité des femelles de 91 %. En conséquence, les estimations du taux intrinsèque de croissance ont montré un retard considérable de la récupération populationnelle de *H. convergens* suite à l'exposition aux deux insecticides. Il a été démontré aussi que quand les larves sont traitées par voie topique, le chlorantraniliprole n'affecte pas l'émergence des adultes de *H. convergens*, tandis que le novaluron cause 100 % de mortalité (Lau, 2014).

Moscardini *et al.* (2015) ont trouvé que le chlorantraniliprole a causé des effets sublétaux sur la biologie de *C. maculata* et *H. convergens* après que ces insectes ont consommé du nectar extrafloral des plantes de tournesol, dont les grains avaient été traités avec l'insecticide. Le temps de nymphose pour *C. maculata* a été prolongé, la fertilité des adultes des deux espèces a été réduite, et le temps nécessaire pour l'éclosion des œufs a été retardé. Dans une autre étude, le chlorantraniliprole a démontré avoir peu de toxicité sur *Cycloneda sanguinea* (L.). La mortalité, la fertilité, la fécondité et le comportement de prédation, étudiés en laboratoire, ainsi que l'impact sur les populations examinées dans le terrain n'ont pas été affectés par le

chlorantraniliprole. Toutefois, cet insecticide a eu un effet répulsif sur *C. sanguinea* (Fernandes *et al.*, 2016).

L'effet du novaluron, après contact topique sur larves de deuxième et quatrième stade de *C. septempunctata*, a été étudié par Olszak et Sekrecka (2008). Ces auteurs ont montré que l'insecticide a causé 24 % de mortalité après 7 jours et ils ont conclu que le novaluron est peu toxique pour cette espèce. Des essais en laboratoire, faits par Olszak *et al.* en 2004, ont révélé que la longévité et la fécondité des femelles adultes de la même espèce et aussi d'*A. bipunctata*, n'ont pas été affectés par le novaluron. Cependant les larves de deuxième et quatrième stade, ont souffert de mortalité importante.

Ces recherches indiquent que prédire l'impact des insecticides sur les coccinelles n'est pas simple. En effet, la susceptibilité des ennemis naturels aux pesticides dépend de plusieurs facteurs, tels que des caractéristiques du pesticide et de l'environnement, des particularités de la proie/hôte, ainsi que des attributs propres à chaque espèce, par exemple la famille, l'espèce et le biotype (Cloyd, 2005; Croft, 1990). La structure de la population au moment des traitements est aussi un facteur important de susceptibilité (Stark *et al.*, 2004). D'une autre part, afin de surmonter les effets des composés toxiques, les insectes peuvent les tolérer ou les neutraliser à travers divers mécanismes, telle la séquestration, l'excrétion et la détoxification (Dowd *et al.*, 1983). Ces mécanismes, ainsi que d'autres, comme le taux d'absorption du pesticide à travers la cuticule et les parois intestinales, sont aussi des facteurs qui peuvent déterminer des différences dans la susceptibilité des ennemis naturels aux pesticides (Cutler et Scott-Dupree, 2007).

Ainsi, chaque espèce possède une tolérance innée aux composés toxiques qui est attribuée surtout à la capacité de détoxification des individus. Certains prédateurs

généralistes pourraient être moins susceptibles que les spécialistes grâce à des habitudes alimentaires qui auraient pu prédisposer les espèces généralistes à mieux résister à l'exposition aux pesticides, car ils sont exposés à une plus grande variété de proies contenant parfois des composés toxiques (Croft, 1990). Étant donné que les prédateurs généralistes consomment une variété de proies, ils pourraient aussi être avantagés comme résultat de la dilution des composés toxiques de chaque proie. D'autres caractéristiques écologiques des ennemis naturels peuvent aussi influencer leurs susceptibilités relatives aux pesticides, tels les habitudes alimentaires, les sources de nutrition alternatives, et le statut nutritionnel de proies et d'hôtes. L'état de développement des individus détermine aussi leur susceptibilité, ce qui donne des opportunités de sélectivité écologique aux pesticides, car on souhaite une fenêtre d'application où le ravageur est vulnérable, mais pas l'ennemi naturel. L'âge d'un arthropode dans un stade de développement donné peut également influencer sa susceptibilité à un pesticide. En général, il semble que les jeunes soient plus sensibles aux pesticides que les individus matures (Stark et Banks, 2003; Stark *et al.*, 2004). La taille, le poids et le sexe des individus jouent aussi un rôle important dans la susceptibilité. Généralement, les individus de moindre taille seront plus susceptibles aux pesticides par rapport aux individus plus grands à cause de la relation surface du corps/masse corporelle. Étant donné que les femelles ont plus de gras corporel et que les composés toxiques peuvent être séquestrés dans le gras, elles seraient moins susceptibles par rapport aux mâles (mais, c'est ne pas toujours le cas). Par exemple, les femelles de *C. septempunctata* ont plus de gras corporel par rapport aux mâles, ce qui les rend moins susceptibles au malathion (Croft, 1990).

Dans le contexte de la présente thèse, il faut prendre en considération des caractéristiques de chaque espèce de coccinelle, ce qui peut nous aider à poser

quelques hypothèses sur leur susceptibilité aux insecticides (Tab. I.7). Toutefois, des études sur le mode d'action des insecticides en relation au métabolisme des ennemis naturels ne sont pas abondantes pour des composés avec de nouveaux modes d'action comme les diamides anthraniliques (chlorantraniliprole), ce qui limite la prévision des effets de ces composés sur certains arthropodes.

Tableau I.7. Facteurs influençant la susceptibilité des coccinelles *H. axyridis* et *C. maculata* aux insecticides. Les signes + et – représentent la contribution des facteurs (taille, habitudes alimentaires, IGP, statut, phytophagie) à la susceptibilité à être négativement affecté par de composés toxiques.

Espèce	Taille	Habitudes alimentaires	IGP	Statut	Phytophagie	Études préliminaires*
<i>H. axyridis</i>	Plus grande -	Généraliste -	Prédateur -	Envahissante -	Moins +	
<i>C. maculata</i>	Plus petite +	Généraliste -	Proie +	Indigène +	Plus -	Moscardini <i>et al.</i> (2015)

\*Études sur l'effet du chlorantraniliprole et du novaluron sur les deux espèces.

## I.12. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE

Le but général de ce doctorat est de comparer la susceptibilité de deux espèces de coccinelles, la coccinelle envahissante *H. axyridis* et la coccinelle indigène *C. maculata*, importants prédateurs généralistes dans les écosystèmes agricoles au Québec, aux insecticides à risques réduits Altacor® (chlorantraniliprole) et Rimon® (novaluron). Cette étude est pertinente pour l'avancement des connaissances sur les effets des pesticides sur les organismes non visés, ce qui n'est pas toujours pris en considération dans le système d'homologation actuel. Pour ce faire, les deux prédateurs ont été élevés en laboratoire durant cinq ans, à compter du printemps 2012, et de nombreux essais ont été réalisés pendant cette période.

### I.12.1. Objectif 1

Comparer l'effet létal des insecticides Altacor® et Rimon® sur la coccinelle asiatique, *H. axyridis* et la coccinelle maculée, *C. maculata*, selon trois voies d'exposition

Ce premier objectif est abordé dans le premier chapitre, « *Differential sensitivity of an invasive and an indigenous ladybeetle to two reduced-risk insecticides* ». Il a été publié dans *Journal of Applied Entomology* en 2017. Cette étude a généré de l'information sur l'effet des insecticides sur l'éclosion des œufs et sur la mortalité des larves des coccinelles après exposition topique, orale et résiduelle.



Question de recherche : Laquelle des deux espèces de coccinelles étudiées est la plus susceptible aux insecticides à risques réduits?

Hypothèse: La coccinelle indigène est plus affectée par les insecticides à risques réduits, Altacor® et Rimon®, que la coccinelle envahissante.

Justification:

Le fait que la coccinelle asiatique soit un des insectes les plus invasifs (Brown *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2016), indique aussi qu'elle peut s'adapter à des environnements et à des diètes variées. Considérée comme un super prédateur par plusieurs experts, elle est capable de tolérer une grande variété de composés toxiques provenant des proies diverses (Lucas, 2012). En tant que prédateur intragilde, elle a aussi une bonne capacité à tolérer des alcaloïdes provenant d'autres coccinelles (Hautier *et al.*, 2008; Kajita *et al.*, 2010) et même de les détoxifier (Sloggett et Davis, 2010). *Harmonia axyridis* est aussi plus grande que *C. maculata*, ce qui peut la prédisposer à avoir une meilleure tolérance à certains composés toxiques par rapport aux espèces plus petites en raison du ratio surface/volume du corps (Croft, 1990). De plus, Moscardini *et al.*, (2015) ont démontré que la coccinelle maculée est négativement affectée par le chlorantraniliprole. Toutefois, la coccinelle maculée pourrait avoir une meilleure capacité de détoxification par rapport à d'autres espèces.

### 1.12.2. Objectif 2

Évaluer les effets sublétaux des insecticides Altacor® et Rimon® sur la reproduction de la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée

Le deuxième chapitre, « *Sublethal Effects of Two Reduced-risk Insecticides: When the invasive ladybeetle is drastically affected whereas the indigenous not* », a été publié dans *Journal of Pest Science* en 2018. Ce deuxième chapitre, étudie l'impact potentiel de l'insecticide novaluron sur les populations des deux espèces de prédateurs, en considérant l'exposition des adultes à l'insecticide par ingestion de proies traitées, ce qui pourrait éventuellement déstabiliser le statut d'espèce envahissante de la coccinelle asiatique dans certaines situations.

#### Questions de recherche :

- a) Est-ce que les IRRs affectent la reproduction des coccinelles ?
- b) Laquelle des deux espèces est la plus susceptible de manifester des perturbations dans sa reproduction suite à l'exposition aux IRRs ?

#### Hypothèse :

Les deux insecticides ont un impact négatif sur la reproduction des deux coccinelles. Toutefois, la coccinelle maculée indigène est plus affectée que la coccinelle asiatique envahissante.

Justification :

Dans la même optique de la première hypothèse, si ces IRRs sont toxiques pour les deux coccinelles, on pourrait s'attendre à des effets sublétaux sur la reproduction, car il a été démontré que le chlorantraniliprole peut réduire la fertilité de la coccinelle maculée (Moscardini *et al.*, 2015). Il a aussi été démontré que le novaluron réduit la fécondité et la fertilité d'une autre espèce de coccinelle, *H. convergens* (Fernandez, 2015), laquelle appartient à la même sous-famille Coccinellinae que la coccinelle maculée (Hodek *et al.*, 2012).

I.12.3. Objectif 3

Évaluer l'impact des insecticides à risques réduits sur la valeur adaptative de la prédation intragilde pour les deux coccinelles

Après avoir établi la susceptibilité des deux coccinelles aux insecticides, nous nous sommes intéressés à examiner l'effet des insecticides sur la valeur adaptative de la prédation intragilde (IGP) pour chaque espèce. Le troisième chapitre, « *Differential Adaptive Value of intraguild predation between an invasive and an indigenous ladybeetle in presence of a reduced risk insecticide* », a été soumis à la revue Plos One. Cet objectif est d'intérêt, car le succès d'invasion de la coccinelle asiatique est en partie attribuable à sa tendance à attaquer avec succès les espèces indigènes par prédation intragilde. La prédation intragilde peut avoir de conséquences importantes pour le contrôle biologique (Rosenheim *et al.*, 1995). Les résultats obtenus soulignent à quel point un insecticide peut altérer la valeur adaptative de la prédation intragilde effectuée par l'envahisseur.

Questions de recherche :

- a) Pour quelle espèce des deux coccinelles étudiées la valeur adaptative de l'IGP sera telle la plus réduite?
- b) La valeur adaptative de l'IGP, peut-elle être récupérée dans le temps comme conséquence de la neutralisation de l'insecticide par la proie intraguilde?

Hypothèses :

- a) Le chlorantraniliprole et/ou le novaluron réduisent la valeur adaptative de l'IGP pour l'espèce de coccinelle la plus affectée au niveau léthal et sublétal par ces mêmes insecticides.
- b) La valeur adaptative de l'IGP est récupérée dans le temps suite à la neutralisation de l'insecticide par la proie intraguilde.

Justification :

l'IGP est un comportement qui augmente la valeur adaptative des individus, parce qu'il accroît la survie, le développement et la reproduction du prédateur intraguilde (Polis et Holt, 1992). Toutefois, ces avantages sont perdus ou diminués lorsque la proie intraguilde est traitée avec un insecticide, comme résultat de sa toxicité sur le prédateur intraguilde.

Étant donné que les insectes ont la capacité de neutraliser les substances toxiques, par des mécanismes comme la détoxification et l'excrétion (Dowd *et al.*, 1983), une proie intraguilde qui a été récemment exposée à un insecticide devrait être plus

toxique pour le prédateur intragilde qu'une proie qui a été exposée à ce même insecticide il y a plus longtemps à cause du temps nécessaire pour sa neutralisation.

## CHAPITRE I

### DIFFERENTIAL SENSITIVITY OF AN INVASIVE AND AN INDIGENOUS LADYBEETLE TO TWO REDUCED-RISK INSECTICIDES

Paula Cabrera<sup>1</sup>, Daniel Cormier<sup>2</sup>, Éric Lucas<sup>1</sup>

Article publié dans la revue *Journal of Applied Entomology*

Cabrera, P., Cormier, D. et Lucas, É. (2017). Differential Sensitivity of an Invasive and an Indigenous Ladybeetle to Two Reduced-Risk Insecticides. *Journal of Applied Entomology*, 141: 690–701.

<sup>1</sup>Laboratoire de Lutte Biologique, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, 141 Avenue du Président-Kennedy, Montréal, QC H2X 1Y4, Canada

<sup>2</sup>Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 335 Rang des Vingt Cinq E, Saint-Bruno-de-Montarville, QC J3V 0G7, Canada

## ABSTRACT / RÉSUMÉ

The invasive multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas) and the indigenous twelve spotted lady beetle, *Coleomegilla maculata* DeGeer (Col., Coccinellidae) are two important generalist predators commonly found in apple orchards in Quebec, Canada. Both species are exposed to two reduced-risk insecticides, recently adopted to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae) in southeastern Canada. Chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG), an anthranilic diamide insecticide, causes paralyzes of the muscle cells by interfering with the insect ryanodine receptors whereas novaluron (Rimon® EC 10), a benzoylphenyl urea, inhibits the chitin synthesis. The aim of this study was to compare the sensitivity of the invasive ladybeetle *H. axyridis* and the indigenous *C. maculata* to both reduced-risk insecticides through the assessment of lethal effect on eggs and larvae following topical contact, ingestion of treated prey, and exposure to fresh residues, at field rates (50.75 g a.i./ha chlorantraniliprole and 100 g a.i./ha novaluron) in laboratory conditions. Eggs of both species were not affected. Following 6 days of residual contact, chlorantraniliprole and novaluron caused more than 98 % mortality to larvae of both ladybeetle species. In topical contact and ingestion trials, chlorantraniliprole caused less than 18 % mortality to larvae of the two species after 6 days following exposure. Novaluron had a drastically different impact on the two predators. It did not affect the indigenous *C. maculata*, whereas it kills 91 and 96 % of *H. axyridis* individuals after 6 days respectively following topical contact and ingestion. These results illustrate a differential sensitivity to novaluron between two relatively close species (subfamily Coccinellinae), a potential impact on the invasion process by *H. axyridis*, and consequently on the ladybeetle assemblage in the field.

KEY WORDS: Novaluron, chlorantraniliprole, *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, lethal effect

La coccinelle envahissante, *Harmonia axyridis* (Pallas), et la coccinelle indigène *Coleomegilla maculata* DeGeer (Col., Coccinellidae), sont deux prédateurs généralistes couramment observés dans les vergers de pommiers au Québec, Canada. Ces deux espèces sont exposées à deux insecticides à risques réduits récemment adoptés pour lutter contre le carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae). Le chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) est un insecticide de la famille des diamides anthraniliques, qui perturbe les récepteurs de la ryanodine des insectes, causant la paralysie musculaire. Le novaluron (Rimon® 10 EC) est un inhibiteur de synthèse de la chitine qui appartient à la famille chimique des benzoylurées. L'objectif de cette étude, était de comparer la susceptibilité de deux espèces de coccinelles, la coccinelle asiatique (*H. axyridis*) et la coccinelle maculée (*C. maculata*), au chlorantraniliprole et au novaluron, en considérant l'effet létal sur les œufs et les larves selon trois voies d'exposition; contact topique, ingestion de proies contaminées et contact avec les résidus des insecticides. Les expériences ont été faites en laboratoire en utilisant les doses recommandées pour les producteurs de pommes au Québec (50,75 g i.a. / ha de chlorantraniliprole et 100 g i.a. / ha de novaluron). Les œufs des deux espèces n'ont pas été affectés par aucun des insecticides. Toutefois, 98 % des larves des deux espèces, qui ont été exposées aux résidus des insecticides pendant 6 jours, sont mortes. Dans les essais de contact topique et d'ingestion, le chlorantraniliprole a causé moins de 18 % de mortalité aux larves de deux espèces de coccinelles, 6 jours après l'exposition. Le novaluron a eu un impact drastiquement différent sur les deux prédateurs. Il n'a pas affecté la coccinelle indigène, cependant 91 % et 96 % des individus de la coccinelle



envahissante sont morts, suivant le contact topique et l'ingestion de proies traitées, respectivement. Ces résultats mettent en évidence la susceptibilité différente de deux prédateurs apparentés (sous-famille des Coccinellinae), à un insecticide à risques réduits, ce qui pourrait avoir un impact potentiel sur l'invasion par la coccinelle asiatique et conséquemment, sur l'assemblage des coccinelles.

MOTS-CLEFS: Novaluron, chlorantraniliprole, *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, effet léthal

## 1.1. INTRODUCTION

In Southeastern Canada, reduced-risk insecticides are increasingly used to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae), a major pest in apple orchards. Treatments take place by mid-June and early July. At this time of the year, generalist predators, which prevent significant pest infestations (Fréchette *et al.*, 2008), are present in orchards. Conservation of these natural enemies is an important tool for efficient natural biocontrol and integrated pest management (IPM). Consequently, selective reduced-risk insecticides may help to maintain their populations. Selectivity of these insecticides has been shown by several studies. However their risk for some predators, at particular doses, is unknown. Among predators, ladybeetles are important biocontrol agents (Agnello *et al.*, 2000; Brown, 2011; El-Wakeil *et al.*, 2013). The multicolored Asian ladybeetle, *Harmonia axyridis* (Pallas) (Col., Coccinellidae) is a voracious coccinellid and an invasive species in North America (Alyokhin and Sewell, 2004; Lucas *et al.*, 2007a; Koch and Galvan, 2008), South America (Koch *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2011), Africa (Stals and

Prinsloo, 2007; Nedvěd *et al.*, 2011) and Europe (Coutanceau, 2006; Roy and Wajnberg, 2007). In Southeastern Canada, *H. axyridis* was found in apple orchards in 1994 (Coderre *et al.*, 1995) and currently it is one of the most abundant species as a result of exploitative, interference competition and intraguild predation with indigenous and previous invasive ladybeetles (Flowers *et al.*, 2005; Lucas, 2005; Lucas *et al.*, 2007b; Pell *et al.*, 2008). The twelve-spotted ladybeetle, *Coleomegilla maculata* De Geer (Col., Coccinellidae), one of the most polyphagous coccinellid species (Hodek and Evans, 2012), is the most common indigenous ladybeetle in various crops (Roger *et al.*, 1995; Lucas *et al.*, 2002; Honek, 2012). It preys on numerous pests including aphids, chrysomelid and lepidopteran eggs and larvae, (Pimentel, 1961; Andow and Risch, 1985; Coderre and Tourneur, 1988; Hazzard and Ferro, 1991; Giroux *et al.*, 1995), and has resisted *H. axyridis* and two other ladybeetle invaders (Lucas *et al.*, 2007b).

In apple orchards, eggs and larvae of ladybeetles might be exposed to insecticides during and after spraying. In coccinellids, the egg and larval stages represent 15-20 % and 55-65 % of the total preimaginal developmental time respectively (Nedvěd and Honěk, 2012). Additionally, this is a period of high insecticide susceptibility (Michaud, 2012). Consequently, mortality of eggs and larvae, as a result of insecticide exposure, could have a substantial impact on ladybeetle populations and consequently on biocontrol services in the orchard. *Harmonia axyridis* and *C. maculata* belong to the subfamily Coccinellinae (tribes Coccinellini and Tytthaspidini, respectively) (Nedvěd and Kovar, 2012). Yet, closely related species, even within the same genus, can express large differences in pesticide tolerance, and variances in feeding habits and behaviour could result in a differential susceptibility to insecticides (Croft, 1990).

Two ovicidal and larvicidal reduced-risk insecticides, chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® EC 10), registered in Canada since 2008 to control codling moth, are currently employed in Quebec apple orchards (Morin *et al.*, 2014). Chlorantraniliprole belongs to the anthranilic diamides, a new class of selective insecticides, conceived to control several lepidopteran pests. It interferes with the insect ryanodine receptors causing paralysis of muscle cells and eventually death of sensitive species (Cordova *et al.*, 2006; Dinter *et al.*, 2009). Novaluron, a benzoylphenyl urea insecticide, is a chitin synthesis inhibitor perturbing the cuticle formation. Insects die from abnormal endocuticular deposition and abortive molting (Cutler and Scott-Dupree, 2007). Both compounds act by ingestion and contact (Ascher *et al.*, 1987; Bassi *et al.*, 2009; Cutler and Scott-Dupree, 2007) and are recommended for use in integrated pest management (IPM) programs due to the high toxicity to a number of pests and the low negative impact on the environment (Ishaaya *et al.*, 2003; Dinter *et al.*, 2008; Cutler and Scott-Dupree, 2007). Research has showed slightly or no toxicity of these reduced risk-insecticides on natural enemies (Anthoridae, Braconidae, Cantharidae, Carabidae, Coccinellidae, Encyrtidae, Miridae, Phytoseiidae, Tiphidae) (Carvalho *et al.*, 2010; Broughton *et al.*, 2014; Larson *et al.*, 2014; Mills *et al.*, 2015; Fernandes *et al.*, 2016), as well as lethal effect (Chrysopidae, Pentatomidae, Phytoseiidae) (Cutler *et al.*, 2006; Lefebvre *et al.*, 2012; Amarasekare *et al.*, 2016). Regarding coccinellids, lethal effect of chlorantraniliprole and novaluron vary on the species, insecticide dose-concentration, and route of exposure (Chappell, 2007; Dinter *et al.*, 2008; Olszak and Sekrecka, 2008; Sabry *et al.*, 2014; Fernandez, 2015).

Ladybeetles are exposed to insecticides by three main routes: topical contact, occurring during insecticide applications in the orchard for a brief period of time, ingestion of contaminated preys (via classical predation, intraguild predation and

cannibalism), and residual contact, to which larvae and eggs can be exposed in a persistent way. Hence, the aim of the present study was to compare the sensitivity of immature stages (eggs and 1<sup>st</sup> instar larvae) of the invasive *H. axyridis* and the indigenous *C. maculata*, to chlorantraniliprole and novaluron, in laboratory conditions, following three routes of exposure, topical contact (eggs tested only by this route of exposure), ingestion and residual contact, at field rates used in apple orchards in Quebec.

## 1.2. MATERIALS AND METHODS

### 1.2.1. Insects

*Harmonia axyridis* and *C. maculata* individual adults were collected in 2012 in Quebec at Sainte-Agathe (46°23'0.3"N and 71°24'33.5"W) and Saint-Edmond (45°49'9.8"N and 72°37'16.4"W) respectively. Insects were brought to the laboratory and reared in a growth chamber at 23°C, 16L : 8D, and 70% RH. The diet consisted of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hem., Aphididae) reared in potato plants, pollen and sweetened solution (sugar 10% w/v). Insect rearing and bioassays were performed at *Laboratoire de Lutte Biologique* in the *Université du Québec à Montréal* in Montreal, Canada.

### 1.2.2. Insecticides

Doses of insecticides used in all bioassays correspond to the field rates recommended for apple orchards in Quebec: 50.75 g a.i./ha chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG, DuPont Canada, Mississauga, ON) and 100 g a.i./ha novaluron (Rimon® 10 EC, Makhteshim-Agan of North America, Raleigh, NC). All preparations were based on a 1000 L/ha spray volume. Therefore, concentrations of insecticides in the solutions used for the bioassays were 50.75 ppm for chlorantraniliprole and 100 ppm for novaluron.

### 1.2.3. Bioassays

Three bioassays, representing three different routes of exposure, were conducted to assess lethal effect of insecticides on coccinellids: topical contact, ingestion and residual contact. Eggs were collected daily for a maximum of four days and placed in a refrigerator at 7°C in order to synchronise physiological age for the bioassays. These individuals were all removed from the refrigerator at the same time and eggs from each collection day were mixed to be used in the topical contact bioassay. Egg mortality was evaluated only for topical contact. Mortality rates in control groups were not higher than 12 %. In the case of larvae, eggs were placed in a growth chamber (23°C, 16L: 8D, and 70% RH) for hatching, which took three days. First instar larvae, emerged the same day, and were collected for the bioassays. Mortality of larvae, when exposed to insecticides as 1<sup>st</sup> instar, was evaluated in the three bioassays. Larvae were considered dead when they did not respond to gentle paintbrush contact. IOBC toxicity classes were used to classify the insecticides (Boller

*et al.*, 2006). Maximum cumulative mortality of larvae in control groups in the three bioassays, at six days, was not higher than 14.6 %.

#### 1.2.3.1. Topical contact

To assess egg mortality, the experimental unit consisted of 30 eggs treated with chlorantraniliprole, novaluron or water as a control. Each experimental unit was replicated three times for a total of 90 individuals per treatment. Eggs were placed on filter paper in Petri dishes (90 mm diameter) and treated with a Potter tower (Burkard Scientific, Uxbridge, UK) (1 ml solution and 2 mg/cm<sup>2</sup> aqueous insecticide deposit). Each experimental unit was transferred to an untreated 50 mm diameter Petri dish with wet cotton by means of a brush, and kept in a holding room at 23°C, 16L: 8D, and 70% RH. Egg hatch was assessed daily until complete hatching and for a maximum of six days. In the case of larvae, the experimental unit also consisted of 30 insects treated as above. Newly emerged larvae were placed dorsal surface up on filter papers in Petri dishes (90 mm diameter) and treated with the Potter tower. Larvae were transferred individually to 50 mm diameter Petri dishes after applications and kept in a holding room at 23°C, 16L: 8D, and 70% RH during six days. Untreated *M. persicae* aphids were offered *ad libitum* to treated larvae during six days on a daily basis. Evaluation of mortality was performed at 24, 72 h and 6 days after start of exposure to insecticides.

### 1.2.3.2. Ingestion

The experimental unit for this bioassay consisted of 30 newly emerged coccinellid larvae placed individually in Petri dishes and provided, during 24 h, with 1 mg of treated *M. persicae* (Potter tower: 1 ml solution and 2 mg/cm<sup>2</sup> aqueous insecticide deposit). A 24 h period of feeding on contaminated prey was selected as a reference, assuming that most individuals in an aphid colony would contain the insecticide shortly after treatment. Aphids in every experimental unit were treated with a different insecticide solution or water. Leftovers aphids were removed afterwards and larvae were fed with untreated aphids daily for 5 days. Bioassay was replicated three times and placed in a holding room (23°C, 16L: 8D, and 70% RH) for six days. Mortality of larvae was assessed at 24, 72 h and 6 days after start of exposure to treated prey.

### 1.2.3.3. Residual contact

Ventilated dry Petri dishes (50 mm diameter), previously dipped in insecticide solutions or water, were allowed to dry for 1 h before coccinellid larvae were individually introduced. These were fed *ad libitum* with untreated *M. persicae* aphids daily and placed in a holding room (23°C, 16L: 8D, and 70% RH) for six days. Experimental units, replicated 3 times, consisted of 30 Petri dishes treated with the same solution and containing individual 1<sup>st</sup> instar larvae. Larval mortality was assessed at 24, 72 h and 6 days after start of exposure to residues. Lethal effect of residues on eggs was not examined in this study.

#### 1.2.4. Statistical analyses

The percentages of egg and larval mortality were corrected according to Abbott formula (1925) and arcsine-square-root transformed (Sokal and Rohlf, 1995), previously to Student's *t* test for each insecticide and time after start of exposure, being coccinellid species the independent variable. Analyses were performed using the JMP® 12.1.0. software (JMP, 2015). Back-transformed data are presented in the results as mean proportions  $\pm$  standard error.

### 1.3. RESULTS

#### 1.3.1. Topical exposure

##### 1.3.1.1. Eggs

Mortality of eggs found in the control group for *H. axyridis* was 10.5 % ( $\pm$  6.9) and 12.2 % ( $\pm$  4.1) for *C. maculata*. Eggs exposed to chlorantraniliprole showed 11 % ( $\pm$  6.1) and 28.4 % ( $\pm$  16.6) mortality, *H. axyridis* and *C. maculata* respectively, without significant differences between species ( $t(3.17) = -0.67, p < 0.5505$ ). Novaluron did not cause important mortality either. Unhatched eggs were 9 % ( $\pm$  4.1) for *H. axyridis*, and 25 % ( $\pm$  10.7) for *C. maculata*, and the difference was not significant ( $t(3.17) = -1.49, p < 0.2261$ ). This classifies chlorantraniliprole and novaluron as harmless (Tab. 1.1) by topical exposure on eggs of the two coccinellid species.



### 1.3.1.2. Larvae

Mortality of *H. axyridis* and *C. maculata* in the control groups were, 3,4 % ( $\pm 2.0$ ) and 0 % at 24 h respectively. At 72 h mortality in control was 12.3 % ( $\pm 1.0$ ) for *H. axyridis* and 2.2 % ( $\pm 2.2$ ) for *C. maculata*. At 6 days, mortality reached 14.6 % ( $\pm 2.9$ ) and 3.3 % ( $\pm 1.9$ ) (*H. axyridis* and *C. maculata* respectively). Chlorantraniliprole did not cause mortality rates higher than 6.5% at 24, 72 h or 6 days (Fig. 1.1- a, c, e), and there was no significant effect of coccinellid species at any time of evaluation (24 h:  $t(3.79) = 0.89, p < 0.4259$ ; 72 h:  $t(2.14) = 0.76, p < 0.5212$ ; 6 days:  $t(3.92) = 0.01, p < 0.9889$ ). Novaluron did not cause more than 1.1 % mortality at 24 h (Fig. 1.1-b) without significant differences between *H. axyridis* and *C. maculata* ( $t(2) = 1.0, p < 0.4226$ ). Then, at 72 h, novaluron caused significant higher mortality to *H. axyridis* (76 %) than to *C. maculata* (8 %) (Fig. 1.1-d) ( $t(2.84) = 4.86, p < 0.0187$ ). At six days, the same pattern was observed (91 and 8 % respectively) (Fig. 1.1-f) ( $t(2.45) = 6.31, p < 0.0143$ ). Therefore, cumulative mortality obtained in the topical contact test indicates that novaluron was toxic only for *H. axyridis* larvae and harmless for *C. maculata*, whereas chlorantraniliprole was harmless for both coccinellid species (Tab. 1.1).

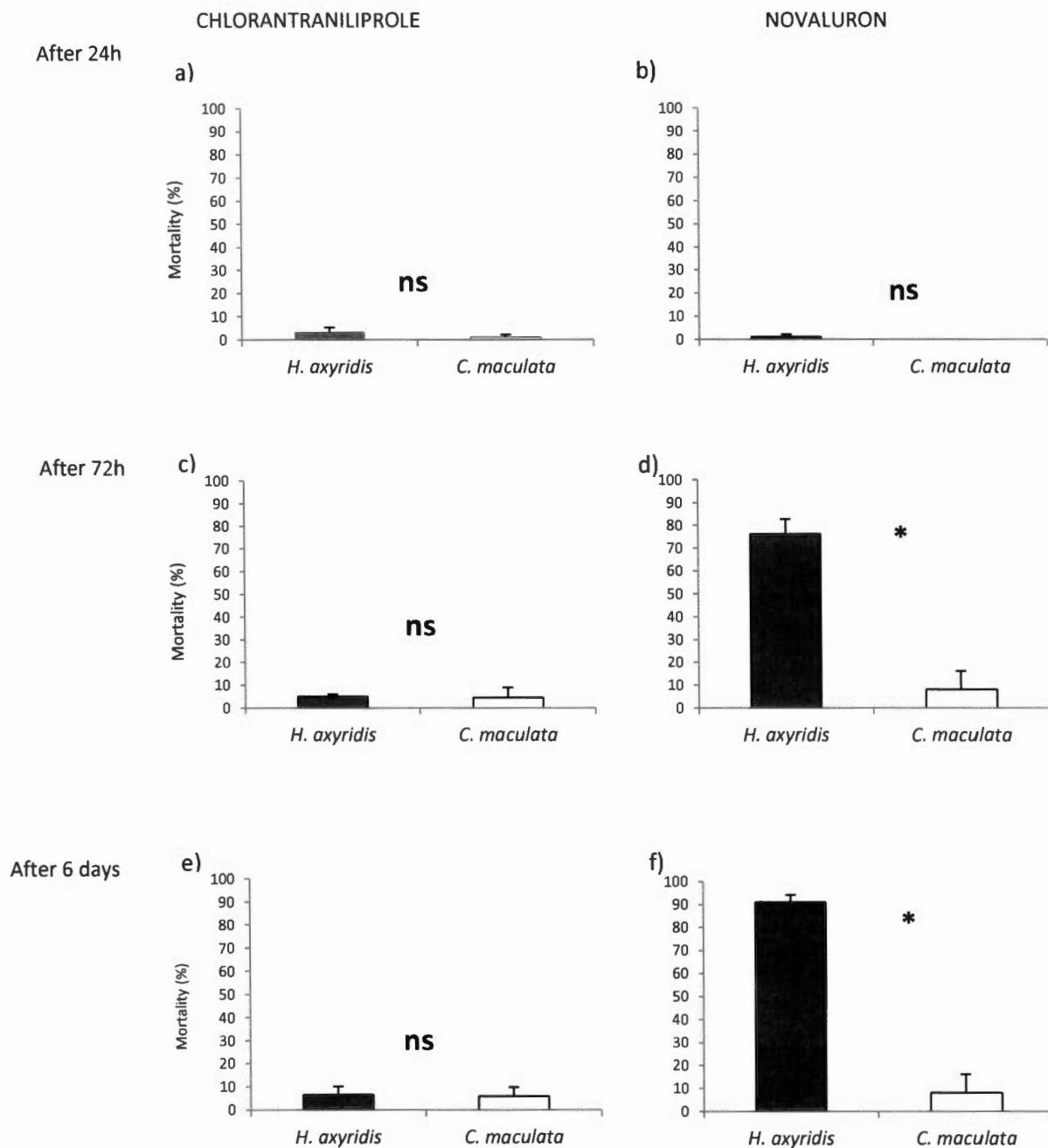


Figure 1.1 Cumulative mortality of *H. axyridis* and *C. maculata*, following topical exposure of 1<sup>st</sup> instar larvae to chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) at 24 (a), 72 h (c), and 6 d (e) and to novaluron (Rimon® 10 EC) at 24 (b), 72 h (d), and 6 d (f) (mean

%  $\pm$  SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test,  $\alpha = 0.05$ ).

### 1.3.2. Ingestion of treated prey

Mortality of *H. axyridis* in the control group was 2.2 % ( $\pm$  1.1) at 24 h, 8 % ( $\pm$  4.6) at 72 h, and 13.6 % ( $\pm$  6.0) at 6 days. *Coleomegilla maculata*'s mortality in the control was 2.3 % ( $\pm$  2.3) at 24 h, 4.9 % ( $\pm$  4.9) at 72 h, and 10.9 % ( $\pm$  3.8) at 6 days. Chlorantraniliprole did not cause high mortalities at 24 hours after ingestion of treated aphids (10 % for *H. axyridis* and no mortality observed for *C. maculata*) (Fig. 2.2-a), and the difference between species was significant ( $t(2) = 171.23$ ,  $p < 0.0001$ ). At 72 hours, mortality of *H. axyridis* increased to 17 % and *C. maculata* mortality was 1 % (Fig. 1.2-c). No significant difference between rates was found in this case, ( $t(2.45) = 1.54$ ,  $p < 0.2409$ ). At 6 days, mortality of both ladybeetles did not increase (Fig. 1.2-e) and no statistical difference between them was found ( $t(2.40) = 1.37$ ,  $p < 0.2847$ ), meaning that chlorantraniliprole is harmless on larvae when ingested (Tab. 1.1).

After 24 h ingesting prey treated with novaluron, *H. axyridis* larvae showed 7% mortality and there were no dead *C. maculata* individuals (Fig. 1.2-b). Difference in larval mortality between species was not significant ( $t(2) = -1.98$ ,  $p < 0.1863$ ). Nevertheless, at 72 h, 94 % of *H. axyridis* larvae had died, contrasting drastically with 14.6 % mortality of *C. maculata* (Fig. 1.2-d). In this case the difference between mortality rates was statistically significant ( $t(2.17) = 9.03$ ,  $p < 0.0093$ ). At 6 days, mortality increased to 96 % for *H. axyridis* and to 16 % for *C. maculata* (Fig. 1.2-f). Difference in mortality rates between species was still significant ( $t(2.03) = 12.24$ ,  $p$

< 0.0062). These results show that novaluron was toxic for *H. axyridis* and harmless for *C. maculata* (Tab. 1.1) when feeding on treated preys.

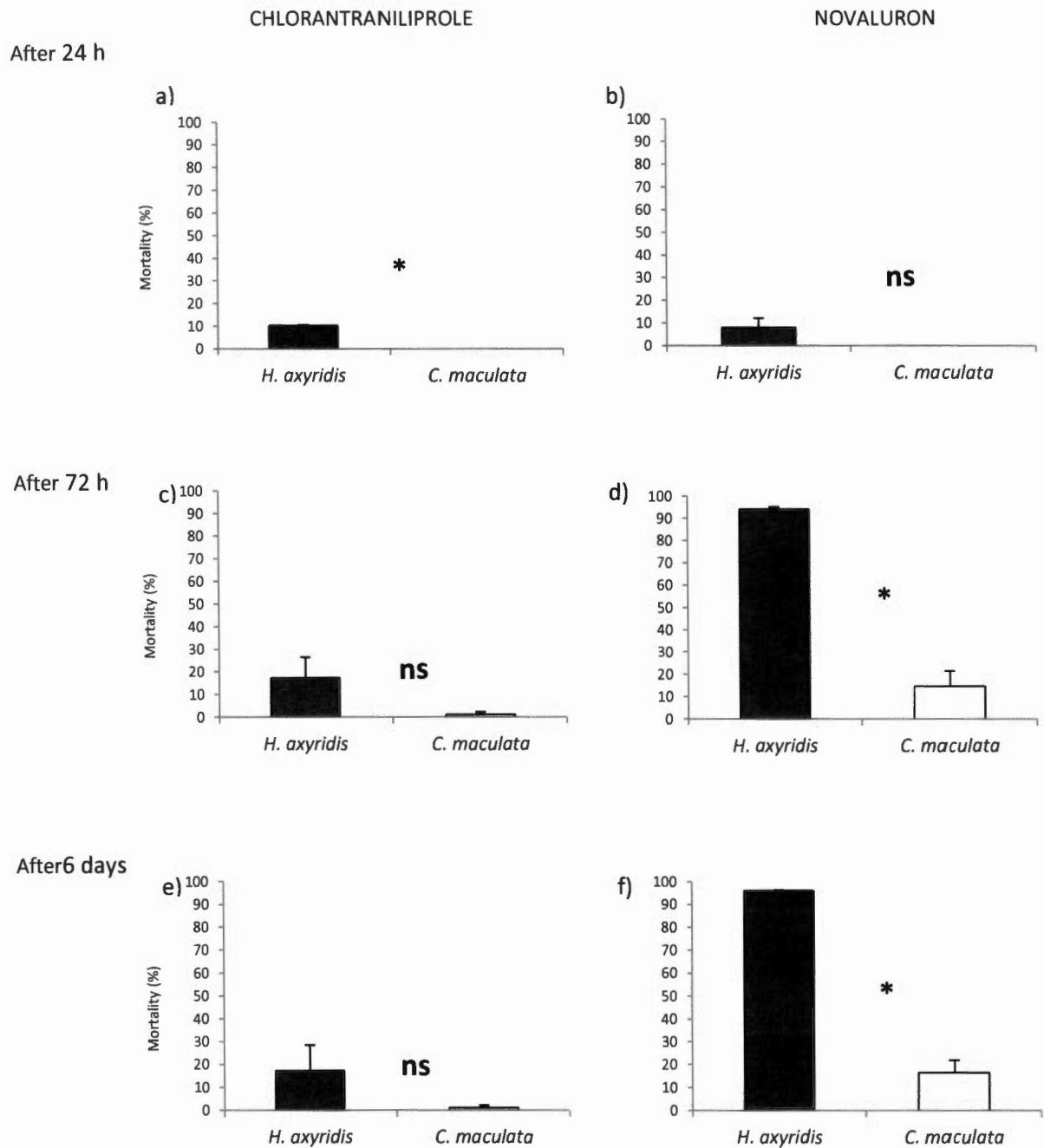


Figure 1.2 Cumulative mortality of 1<sup>st</sup> instar larvae of *H. axyridis* and *C. maculata*, following ingestion of treated preys during 24 h, with chlorantraniliprole (Altacor<sup>®</sup> 35 WG) at 24 (a), 72 h (c), and 6 d (e), and novaluron (Rimon<sup>®</sup> 10 EC) at 24 (b), 72 h

(d), and 6 d (f) (mean %  $\pm$  SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test,  $\alpha = 0.05$ ).

### 1.3.3. Contact with residues

Mortality found in the control group for *H. axyridis* was 3.7 % ( $\pm$  2.2) at 24 h, 4.8 % ( $\pm$  1.5) at 72 h, and 7.2 % ( $\pm$  1.3) at 6 days. Mortality of *C. maculata* in the control was 0 % at 24 h, 3.4 % ( $\pm$  1.9) at 72 h, and 10 % ( $\pm$  3.2). Larvae exposed to insecticide residues showed higher mortality rates than mortalities found in the topical contact and ingestion bioassays (Fig. 1.3). Chlorantraniliprole caused 56 % mortality to *H. axyridis* and 46 % to *C. maculata* after 24 h of exposure (Fig. 1.3 a), without a significant difference between coccinellid species ( $t(3.97) = 0.86, p < 0.4605$ ). At 72 h, mortality rates reached 98 and 89 % (*H. axyridis* and *C. maculata* respectively) (Fig. 1.3 c) without a significant difference between species either ( $t(3.03) = 2.82, p < 0.0661$ ). By the end of the evaluation period (6 days), 99 % of *H. axyridis* individuals had died and no survival was detected for *C. maculata* (Fig. 1.3 e). Again, no significant difference was found between ladybeetles ( $t(2) = -1, p < 0.4226$ ). Consequently, chlorantraniliprole was toxic for both *H. axyridis* and *C. maculata* (Tab. 1.1) when exposed to residues.

Mortality caused by novaluron showed a similar trend. After 24 h of exposure to residues, *H. axyridis* exhibited higher mortality (44 %) than *C. maculata* (8 %) (Fig. 1.3-b), with no statistical difference ( $t(3.97) = 2.51, p < 0.0666$ ). Mortality rates were similar for both species at 72 h (98 % for *H. axyridis* and 86 % for *C. maculata*) (Fig. 1.3-d) and effect of coccinellid species was not detected ( $t(3.46) = 2.04, p <$

0.1206). At 6 days, none of *H. axyridis* larvae had survived and 99% of *C. maculata* larvae had died (Fig. 1.3-f), without a statistical difference between mortality rates between both ladybeetles ( $t(2) = 1, p < 0.4226$ ). Thus, novaluron was toxic for both coccinellids (Tab. 1.1).

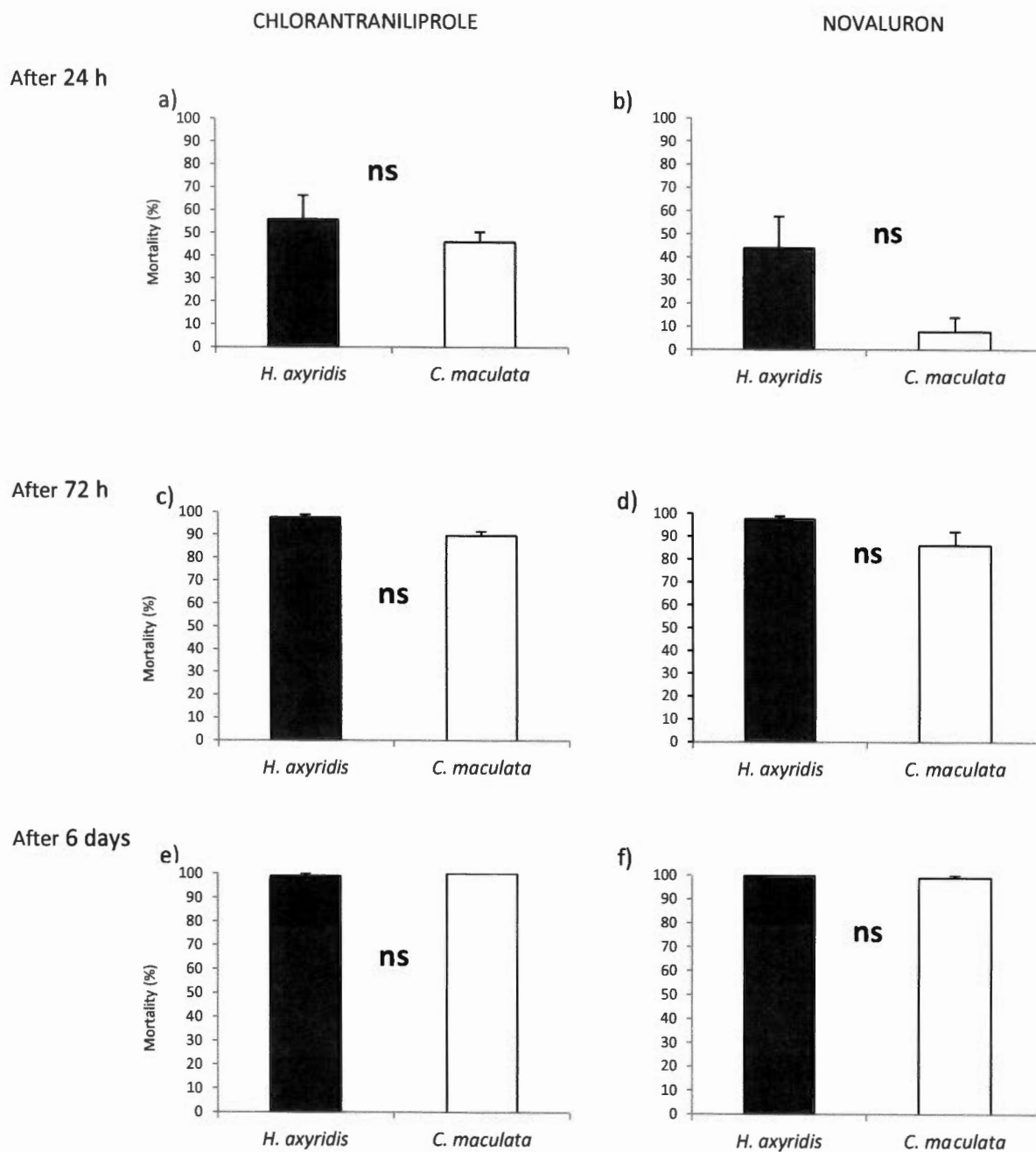


Figure 1.3 Cumulative mortality of 1<sup>st</sup> instar larvae of *H. axyridis* and *C. maculata* following residual contact with chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) at 24 h (a), 72 h



(c), and 6 days (e) and novaluron (Rimon® 10 EC) at 24 (b), 72 h (d), and 6 d (f) after start of exposure (mean %  $\pm$  SE). Percent data were corrected by Abbott (1925) and arcsine transformed before analysis. Back-transformed data are presented. (Unpaired t test,  $\alpha = 0.05$ )

Tableau 1.1 IOBC toxicity classes for chlorantraniliprole and novaluron on *H. axyridis* and *C. maculata* eggs and larvae (1<sup>st</sup> instar at the beginning of tests) at 6 days after start of exposure.

Species	Insecticide	Route of exposure			
		Topical		Ingestion	Residual
		Eggs	Larvae	Larvae	Larvae
<i>H. axyridis</i>	Chlorantraniliprole	1	1	1	3
	Novaluron	1	3	3	4
<i>C. maculata</i>	Chlorantraniliprole	1	1	1	4
	Novaluron	1	1	1	3

Reduction of mortality:

1 = < 30 % harmless; 2 = 30 – 79% moderately harmful; 3 = 80 – 99% harmful;

4 = > 99% harmful. Boller *et al.*, (2006)

#### 1.4. DISCUSSION

Our results showed that *H. axyridis* and *C. maculata* do not have a different sensitivity to chlorantraniliprole. This insecticide is harmless for eggs and larvae when they are topically exposed. Similarly, larvae are not affected after ingestion. However, chlorantraniliprole, as well as novaluron, was harmful for both coccinellid larvae after exposure to fresh residues. Novaluron did not affect eggs after topical contact. Yet, it resulted toxic only for *H. axyridis* larvae following topical contact and

ingestion, indicating that the indigenous *C. maculata* was more tolerant to novaluron than the invasive *H. axyridis*, a major finding of this study.

Concerning eggs, since they were not affected by any of the insecticides when topically treated, impermeability of the egg shell to chlorantraniliprole, and particularly to novaluron, could explain low mortality rates, although it is unknown if oviposition on active insecticide residues affects eggs in the orchard. As an example, codling moth eggs oviposited on novaluron residues, have shown mortality rates twice higher than eggs topically treated (Cormier *et al.*, 2013; Cormier *et al.*, 2017). Wise *et al.*, (2010) found a similar trend for the eggs of Cranberry fruitworm, *Acrobasis vaccinia* Riley (Lep., Pyralidae), laid on novaluron residues, versus eggs topically treated with this insecticide in blueberry leaves. Hence, mortality of eggs of both ladybeetle species should be assessed following residual exposure to confirm sensitivity to these reduced-risk insecticides.

With respect to larvae, the differential sensitivity to novaluron, found when both ladybeetle species are exposed topically and orally, could be explained by differences in physiological mechanisms that affect sensitivity to pesticides, such as penetration, sequestration, excretion, detoxification or target site sensitivity. Feeding habits might also contribute to sensitivity to insecticides, since natural enemies can intake toxic plant secondary compounds from their prey or by feeding directly on plant materials, and these can predispose predators to detoxify pesticides (Croft, 1990). Bartlett (1963) found that general coccinellid feeders were less susceptible to pesticides than specialists in citrus orchards, meaning that probably long-term habits preadapted the generalist species to better tolerate pesticide exposure. We thought that similarly, pollinivory of *C. maculata*, could explain its lower sensitivity to an insecticide, compared to *H. axyridis*. For example, digestive tract analysis during anthesis in corn have shown that *C. maculata* larvae

consume significantly higher quantities of pollen than *H. axyridis* larvae (Lundgren *et al.*, 2004) and pollen is known for containing toxic secondary metabolites (Detzel and Wink, 1993; Kempf *et al.*, 2010; Sedivy *et al.*, 2012). If a similar trend is found in other crops, it would indicate that *C. maculata* is potentially exposed to a higher pressure of toxic metabolites than *H. axyridis*. Of course, this hypothesis would not explain why *C. maculata* has a higher tolerance to novaluron particularly, and should be tested in future research.

Regarding exposure to insecticides by ingestion, our results represent mortality after ingestion of treated prey in a controlled environment for 24 h. However, the amount of treated prey consumed by larvae in the orchard can vary depending on voracity of the predator and availability of prey in the treated area, which might result on different outcomes of mortality. Another situation of exposure of larvae to ingestion of insecticides can be sibling neonatal cannibalism. This is an automatic behaviour, where neonates consume unhatched conspecific eggs, and it is known for both coccinellid species (Osawa, 1989, 1992; Gagné *et al.*, 2002). If eggs have been topically exposed to insecticides during a treatment in the orchard, neonates will acquire insecticides by ingestion. Thus, considering the differential sensitivity of *H. axyridis* and *C. maculata* to novaluron, *H. axyridis* neonates are at higher risk than *C. maculata* neonates if eggs topically contact novaluron. Intraguild predation, an occasional behaviour for ladybeetles (Lucas, 2012), can be another way to ingest insecticides if the intraguild prey has been exposed to the compound. The Asian ladybeetle is a strong intraguild predator, generally dominating the interaction with other coccinellids (Cottrell and Yeargan, 1998; Pell *et al.*, 2008). *Harmonia axyridis* is also a more voracious ladybeetle than *C. maculata*, especially in the latest larval stages (Labrie *et al.*, 2006), which results in a higher probability of exposure to

novaluron via ingestion than *C. maculata*, and this might greatly reduce *H. axyridis* populations in treated orchards.

With respect to residual exposure to novaluron and chlorantraniliprole, larvae were exposed to a more persistent toxic source compared to topical contact or ingestion, which explains higher toxicity for both ladybeetle species. Yet, abiotic factors in the apple orchard affect the remanence of insecticides on foliage (Burrows *et al.*, 2002; Hulbert *et al.*, 2011). Additionally, chlorantraniliprole and novaluron both have translaminar mobility into the leaf (Ishaaya *et al.*, 2003; Lahm *et al.*, 2009), and that is not the case in a Petri dish, where residues stay in the surface, facilitating uptake of insecticides by larvae. In spite of that, translaminar mobility also allows more protection from wash-off, photodegradation and volatilisation, meaning longer residual activity (Stevens *et al.*, 1988), and this increases the chances of exposure for foliage dwelling predators such as coccinellid larvae, because searching activity is a major way of insecticide uptake (Croft, 1990). Semi field research is necessary to explore expected impact of insecticide residues on coccinellid larvae in the orchard.

Application of insecticides is the practice that has the greatest effect on local coccinellid populations (El-Wakeil *et al.*, 2013). Reduced-risk insecticides are expected to have a lower impact on natural enemies compared to conventional compounds. However, results of this study question their selectivity. In the orchard, eggs, larval instars, pupae and adult ladybeetles will be exposed to insecticides topically during spraying, and then by ingestion and by residual contact simultaneously, meaning that both species are highly susceptible to insecticides. The larval stage is the most susceptible of all stages due to its mobility when searching prey. Adult coccinellids are also mobile, but they can also fly out of the orchard, avoiding toxic exposure. In addition, most studies have probed no lethal effect of chlorantraniliprole regarding adult predators (Preetha *et al.*, 2010; Shaw and Wallis,

2010; Campos *et al.*, 2011; Gradish *et al.*, 2011). Novaluron is a chitin synthesis inhibitor, and it only affects immature stages (Trostanetsky and Kostyukovsky, 2008; Cutler and Scott-Dupree, 2007). But sublethal effects on adult individuals exposed to these reduced-risk insecticides can happen (Zotti *et al.*, 2013; Fernandez, 2015; Moscardini *et al.*, 2015). Thus, future research should take in account different ladybeetle stages, including all larval instars, to assess mortality after treatments in field conditions. Moreover, sublethal effects of insecticides can have important consequences in insect populations and they should be added to the lethal effect in order to understand the total effect on *H. axyridis* and *C. maculata*. This can be achieved using Life table studies, which also account for population growth after exposure to pesticides (Stark *et al.*, 2006; Stark *et al.*, 2007; Talebi *et al.*, 2008).

Chlorantraniliprole and novaluron are also approved for use in other crops in Canada. For example, Rimon® EC 10 is used to control the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* Say (Col., Chrysomelidae) in potato crops (Makhteshim-Agan Industries, 2009), and natural populations of *C. maculata* are important in controlling this pest (Lucas *et al.*, 2004). *Harmonia axyridis* is also commonly found in this crop (Fréchette *et al.*, 2012), and greatly contributes to aphid control (Kabaluk *et al.*, 2006). Coragen<sup>mc</sup>, containing chlorantraniliprole as the active ingredient, is approved to control the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Hübner) (Lep., Crambidae) and other pests in maize (DuPont, 2016), where *H. axyridis* and *C. maculata* have been recorded as the two most abundant coccinellids (Lucas *et al.*, 2007b). Thus, these reduced-risk insecticides, and particularly novaluron, might have consequences for the local invasive status of the Asian ladybeetle in agricultural landscapes and its interaction with other predators, affecting functional diversity of natural enemies and consequently natural biocontrol.

## 1.5. ACKNOWLEDGMENTS

Funding of this project was provided by the regional industry council of Quebec, that executes the Canadian Agricultural Adaptation Program for Agriculture and Agri-Food Canada, the Program Prime-Vert from the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food from Quebec, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and Canada Foundation for innovation (CFI). I also want to thank Jill Vandermeerschen for her advice in statistical analyses, and Marc Fournier and Franz Vanoosthuyse for their technical support in the laboratory.

## 1.6. REFERENCES

- Abbott, W.S. (1925). A method of computing the effectiveness of an isecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267.
- Agnello, A., Chouinard, G., Firlej, A., Turechek, W., Vanoosthuyse, F. and Vincent, C. (2000). Tree fruit field guide to insect, mite and disease pests and natural enemies of Eastern North America. Natural Ressource, Agriculture, and Engineering Service, Ithaca, New York.
- Alyokhin, A. and Sewell, G. (2004). Changes in a lady beetle community following the establishment of three alien species. *Biological Invasions*, 6(4), 463-471.
- Amarasekare, K. G., Shearer, P.W. and Mills, N. J. (2016). Testing the selectivity of pesticide effects on natural enemies in laboratory bioassays. *Biological Control*, (in press).
- Andow, D. A. and Risch, S. J. (1985). Predation in diversified agroecosystems: relations between a coccinellid predator *Coleomegilla maculata* and its food. *Journal of Applied Ecology*, 22, 357-372.

- Ascher, K., Melamed-Madjar, V., Nemny, N. E. and Tam, S. (1987). The effect of benzoylphenyl urea molting inhibitors on larvae and eggs of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* Hb. (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Plant Diseases and Protection*, 584-589.
- Bartlett, B. R. (1963). The contact toxicity of some pesticide residues to hymenopterous parasites and coccinellid predators. *Journal of Economic Entomology*, 56(5), 694-698.
- Bassi, A., Rison, J. .L, Wiles, J. A. (2009). Chlorantraniliprole (DPX-E2Y45, RYNAXYPYR®, CORAGEN®), a new diamide insecticide for control of codling moth (*Cydia pomonella*), colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*) and european grapevine moth (*Lobesia botrana*). *Nova Gorica*, 4, 39-45.
- Boller, E. F., Vogt, H., Ternes, P. and Malavolta, C. (2006). Working document on selectivity of pesticides. Internal newsletter issued by the Publication Commission for the IOBC/WPRS Council and Executive Committee Issue, 9.
- Broughton, S., Harrison, J. and Rahman T. (2014). Effect of new and old pesticides on *Orius armatus* (Grosscurt) - an Australian predator of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Pest Management Science*, 70(3), 389-397.
- Brown, M. W. (2011). Importance of early arrival of adult *Harmonia axyridis* for control of *Aphis spiraecola* on apple. *Biocontrol*, 56(1), 65-69.
- Brown, P. M., Thomas, C. E., Lombaert, E., Jeffries, D. L., Estoup, A. and Handley, L-JL. (2011). The global spread of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae): distribution, dispersal and routes of invasion. *Biocontrol*, 56(4), 623-641.
- Burrows, H. D., Canle, L. M., Santaballa, J. A. and Steenken, S. (2002). Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides. *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology*, 67(2), 71-108.
- Campos, M. R., Picanco, M. C., Martins, J. C., Tomaz, A. C., Guedes, R. N. C. (2011). Insecticide selectivity and behavioral response of the earwig *Doru luteipes*. *Crop Protection*, 30(12), 1535-1540.

- Carvalho, G. A., Godoy, M. S., Parreira, D. S., Lasmar, O., Souza, J. R. and Moscardini, V. F. (2010). Selectivity of growth regulators and neonicotinoids for adults of *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 36(2), 195-201.
- Chappell, A. S. (2007). Reliance on predators in making cotton aphid treatment decisions. (M.S.). University of Arkansas.
- Coderre, D., Lucas, É. and Gagné, I. (1995). The occurrence of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) in Canada. *The Canadian Entomologist*, 127(7), 609-611.
- Coderre, D. and Tourneur, J. (1988). Déclin estival des populations aphidiennes du maïs. *Revue d'entomol du Québec*, 32, 16-24.
- Cordova, D., Benner, E. A., Sacher, M. D., Rauh, J. J., Sopa, J. S., Lahm, G.P., Selby, T. P., ... Tao, Y. (2006). Anthranilic diamides: A new class of insecticides with a novel mode of action, ryanodine receptor activation. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 84(3), 196-214.
- Cormier, D., Pelletier, F. and Chouinard, G. (2013). Residual toxicity of six reduced-risk insecticides to codling moth eggs and neonate larvae. *IOBC-WPRS Bulletin*, 91, 147-151.
- Cormier, D., Pelletier, F., Chouinard, G., Joannin, R., Vanoosthuyse, F. and Joannin, R. (2017). Modelling the impact of an insecticide treatment on codling moth populations. *Acta Horticulturae*. 1160, 307-312
- Cottrell, T. E. and Yeargan, K. V. (1998). Intraguild predation between an introduced lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), and a native lady beetle, *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 71, 159-163.
- Coutanceau, J-P. (2006). *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773): une coccinelle asiatique introduite, acclimatée et en extension en France. *Bulletin de la société entomologique de France*, 111(3), 395-401.
- Croft, B. A. (1990). Arthropod biological control agents and pesticides. John Wiley and Sons Inc., New York.



- Cutler, G. C. and Scott-Dupree, C. D. (2007). Novaluron: prospects and limitations in insect pest management. *Pest Technology*, 1, 38-46.
- Cutler, G. C., Scott-Dupree, C. D., Tolman, J. H. and Harris, CR. (2006). Toxicity of the insect growth regulator novaluron to the non-target predatory bug *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Biological Control*, 38(2), 196-204.
- Detzel, A. and Wink, M. (1993). Attraction, deterrence or intoxication of bees (*Apis mellifera*) by plant allelochemicals. *Chemoecology*, 4, 8-18.
- Dinter, A., Brugger, K., Bassi, A., Frost, N. M. and Woodward, M. D. (2008). Chlorantraniliprole (DPX-E2Y45, DuPont™ Rynaxypyr®, Coragen® and Altacor® insecticide) - a novel anthranilic diamide insecticide - demonstrating low toxicity and low risk for beneficial insects and predatory mites. *IOBC-WPRS Bulletin*, 35, 128-135.
- Dinter, A., Brugger, K. E., Frost, N. M. and Woodward, M. D. (2009). Chlorantraniliprole (Rynaxypyr): A novel DuPont™ insecticide with low toxicity and low risk for honey bees (*Apis mellifera*) and bumble bees (*Bombus terrestris*) providing excellent tools for uses in integrated pest management. 10<sup>th</sup> International Symposium of the ICP-Bee Protection Group. Hazards of pesticides to bees.
- DuPont. (2012). Insecticide CORAGEN<sup>mc</sup> DUPONT<sup>mc</sup>. Canadian Label. Du Pont Canada, Mississauga (Ontario).
- El-Wakeil, N., Sallam, A., Volkmar, C. and Gaafar, N. (2013). Side effects of insecticides on natural enemies and possibility of their integration in plant protection strategies. In: *Insecticides - Development of Safer and More Effective Technologies* Ed. by Trdan, S. INTECH. 3-56
- Fernandes, M. E. S., Alves, F. M., Pereira, R.C., Aquino, L. A., Fernandes, F. L. and Zanoncio, J. C. (2016). Lethal and sublethal effects of seven insecticides on three beneficial insects in laboratory assays and field trials. *Chemosphere*, 156, 45-55.

- Fernandez, L. (2015). Lethal and sublethal effects of pesticides used in western United States orchards on *Hippodamia convergens*. (Ph.D.). University of California, Berkeley, Ann Arbor. Récupéré de *ProQuest Dissertations & Theses Global*.
- Flowers, R., Salom, S. and Kok, L. (2005). Competitive interactions among two specialist predators and a generalist predator of hemlock woolly adelgid, *Adelges tsugae* (Homoptera: Adelgidae), in the laboratory. *Environmental Entomology*, 34(3), 664-675.
- Fréchette, B., Larouche, F. and Lucas, É. (2008). *Leucopis annulipes* larvae (Diptera : Chamaemyiidae) use a furtive predation strategy within aphid colonies. *European Journal of Entomology*, 105(3), 399-403.
- Fréchette, B., Vincent, C., Giordanengo, P., Pelletier, Y. and Lucas É. (2012). Do resistant plants provide an enemy-free space to aphids? *European Journal of Entomology*, 109(1), 135.
- Gagné, I., Coderre, D. and Mauffette, Y. (2002). Egg cannibalism by *Coleomegilla maculata lengi* neonates: preference even in the presence of essential prey. *Ecological Entomology*, 27(3), 285-291.
- Giroux, S., Duchesne, R-M. and Coderre, D. (1995). Predation of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae) by *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae): comparative effectiveness of predator developmental stages and effect of temperature. *Environmental Entomology*, 24(3), 748-754.
- Gradish, A.E., Scott-Dupree, C. D., Shipp, L., Harris, C. R. and Ferguson, G. (2011). Effect of reduced risk pesticides on greenhouse vegetable arthropod biological control agents. *Pest Management Science*, 67(1), 82-86.
- Hazzard, R. V. and Ferro, D. (1991). Feeding responses of adult *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to eggs of Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) and green peach aphids (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology*, 20(2), 644-651.
- Hodek, I. and Evans, E. (2012). Food relationships. In: Hodek, I., Honěk, A. et van Emden, H. F. (dir.). *Ecology and behaviour of the ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p 141-274). Chichester, UK : John Wiley & Sons.

- Honêk A. 2012. Distribution and habitats. In: Hodek, I., Honêk, A. et van Emden, H. F. (dir.). *Ecology and behaviour of the ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p 110-140) Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Hulbert, D., Isaacs, R., Vandervoort, C. and Wise, J. C. (2011). Rainfastness and residual activity of insecticides to control japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) in grapes. *Journal of Economic Entomology*, 104(5), 1656-1664.
- Ishaaya, I., Kontsedalov, S. and Horowitz, A. R. (2003). Novaluron (Rimon), a novel IGR: potency and cross-resistance. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 54(4), 157-164.
- JMP. (2015). *SAS Institute Inc.* (Version 12.1). Cary, NC.
- Kabaluk, J. T., Vernon, R. S. and Henderson, D. (2006). Population development of the green peach aphid and beneficial insects in potato fields in British Columbia. *The Canadian Entomologist*, 138(5), 647-660.
- Kempf, M., Heil, S., Hablauer, I., Schmidt, L., Von der Ohe, K., Theuring, C., Reinhard A.,... Beuerle, T. (2010). Pyrrolizidine alkaloids in pollen and pollen products. *Molecular nutrition & food research*, 54(2), 292-300.
- Koch, R. L. and Galvan, T. L.(2008). Bad side of a good beetle: the North American experience with *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53, 23-35.
- Koch, R. L., Venette, R. C. and Hutchison, W. D. (2006). Invasions by *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae) in the western hemisphere: implications for South America. *Neotropical Entomology*, 35(4), 421-434.
- Labrie, G., Lucas, E. and Coderre, D. (2006). Can developmental and behavioral characteristics of the multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* explain its invasive success? *Biol Invasions*, 8(4), 743-754.
- Lahm, G. P., Cordova, D., Barry, J. D. (2009). New and selective ryanodine receptor activators for insect control. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 17(12), 4127-4133.

- Larson, J. L., Redmond, C. T., Potter, D. A. (2014). Impacts of a neonicotinoid, neonicotinoid-pyrethroid premix, and anthranilic diamide insecticide on four species of turf-inhabiting beneficial insects. *Ecotoxicology*, 1-8.
- Lefebvre, M., Bostanian, N. J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. A. and Hardman, J. M. (2012). Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Journal of economic entomology*, 105(3), 866-871.
- Lucas, É. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102(3), 351-364.
- Lucas, É. (2012). Intraguild interactions. In I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 343-374). Chichester : John Wiley & Sons.
- Lucas, É., Gagne, I., Coderre, D. (2002). Impact of the arrival of *Harmonia axyridis* on adults of *Coccinella septempunctata* and *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 99(4), 457-463.
- Lucas, É., Giroux, S., Demougeot, S., Duchesne, R. M. and Coderre, D. (2004). Compatibility of a natural enemy, *Coleomegilla maculata lengi* (Col., Coccinellidae) and four insecticides used against the Colorado potato beetle (Col., Chrysomelidae). *Journal of Applied Entomology*, 128(3), 233-239.
- Lucas, É., Labrie, G., Vincent, C. and Kovach, J. (2007a). The multicoloured Asian ladybird beetle: beneficial or nuisance organism? In: *Biological control: a global perspective*. Vincent, C., Goettel, M. S. and Lazarovits, G. (dir.) CABI, Wallingford.
- Lucas, É., Vincent, C., Labrie, G., Chouinard, G., Fournier F, Pelletier F, Bostanian N, ...Lafontaine, P. (2007b). The multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Quebec agroecosystems ten years after its arrival. *European Journal of Entomology*, 104(4).
- Lundgren, J. G., Razzak, A. A. and Wiedenmann, R. N. (2004). Population responses and food consumption by predators *Coleomegilla maculata* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) during anthesis in an Illinois cornfield. *Environmental Entomology*, 33(4), 958-963.

- Makhteshim-Agan Industries, 2009. RIMON Novaluron Insecticide. Canadian Label. Raleigh, NC.
- Michaud, J. P. (2012). Coccinellids in biological control. In I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honěk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)* (p. 488-519) Chichester : John Wiley & Sons
- Mills, N. J., Beers, E. H., Shearer, P. W., Unruh, T. R. and Amarasekare, K. G. (2015). Comparative analysis of pesticide effects on natural enemies in western orchards: A synthesis of laboratory bioassay data. *Biological Control*, 102, 17-25.
- Morin, Y., Cormier, D. et Chouinard, G. (2014). Le carpocapse de la pomme, Fiche N° 76. In : *Guide de référence en production fruitière intégrée* Ed. by. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec.
- Moscardini, V. F., Gontijo, P. C., Michaud, J. P. and Carvalho, G. A. (2015). Sublethal effects of insecticide seed treatments on two nearctic lady beetles (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecotoxicology*, 24(5), 1152-1161.
- Nedvěd, O., Háva, J. and Kulíková, D. (2011). Record of the invasive alien ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera, Coccinellidae) from Kenya. *ZooKeys*, 106, 77.
- Nedvěd O, Honěk A. (2012). Life history and development. In I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honěk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 54-109) Chichester : John Wiley & Sons
- Nedvěd O, Kovář I. (2012). Appendix: list of genera in tribes and subfamilies. In I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honěk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 526-531) Chichester : John Wiley & Sons
- Olszak, R. W. and Sekrecka, M. (2008). Influence of some insecticides and acaricides on beneficial mites and on *Coccinella septempunctata* (Coleoptera; Coccinellidae) larvae. *Pesticides and Beneficial Organisms IOBC/Wprs Bulletin*, 35, 101-108.
- Osawa, N. (1989). Sibling and non-sibling cannibalism by larvae of a lady beetle *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae) in the field. *Researches on Population Ecology*, 31(1), 153-160.

- Osawa, N. (1992). Sibling cannibalism in the ladybird beetle *Harmonia axyridis*: Fitness consequences for mother and offspring. *Researches on Population Ecology*, 34(1), 45-55.
- Pell, J. K., Baverstock, J., Roy, H. E., Ware, R. L. and Majerus, M. E. N. (2008). Intraguild predation involving *Harmonia axyridis* : a review of current knowledge and future perspectives. In H. E. Roy et E. Wajnberg (dir.), *From Biological Control to Invasion: the Ladybird Harmonia axyridis as a Model Species* (p. 147-168). Springer Netherlands.
- Pimentel, D. (1961). Natural control of caterpillar populations on cole crops. *Journal of Economic Entomology*, 54(5), 889-892.
- Preetha, G., Stanley, J., Suresh, S. and Samiyappan, R. (2010). Risk assessment of insecticides used in rice on miridbug, *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter, the important predator of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal.). *Chemosphere*, 80(5), 8-503.
- Roger, C., Boivin, G. and Coderre, D. (1995). Potentiel de la coccinelle maculée comme agent de lutte biologique contre les lépidoptères ravageurs des crucifères. Research Summary. Horticultural Research & Development Centre, St-Jean-sur-Richelieu/L'Assomption, 24, 23-24.
- Roy, H. et Wajnberg, E. (2007). *From biological control to invasion: the ladybird Harmonia axyridis as a model species*. Springer, Netherlands.
- Sabry, A-kH., Hassan, KA-Z. and Abd-El Rahman, A. (2014). Relative toxicity of some modern insecticides against the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) and their residues effects on some natural enemies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3, 481-491.
- Sedivy, C., Piskorski, R., Müller, A. and Dorn, S. (2012). Too low to kill: concentration of the secondary metabolite ranunculin in buttercup pollen does not affect bee larval survival. *Journal of chemical ecology*, 38(8), 996-1002.
- Shaw, P. W. and Wallis, D. R. (2010). Susceptibility of the European earwig, *Forficula auricularia* to insecticide residues on apple leaves. *New Zealand Plant Protection*, 63, 55-59.

- Sokal, R. et Rohlf, J. (1995). *Biometry : the principles and practice of statistics in biological research* (3<sup>rd</sup> ed. éd.). New York : New York W. H. Freeman.
- Stals, R. et Prinsloo, G. (2007). Discovery of an alien invasive, predatory insect in South Africa: the multicoloured Asian ladybird beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae). *South African Journal of Science*, 103(3-4), 123-126.
- Stark, J. D., Sugayama, R. L. and Kovaleski, A. (2006). Why demographic and modeling approaches should be adopted for estimating the effects of pesticides on biocontrol agents. *BioControl*, 52(3), 365-374.
- Stark, J. D., Vargas, R. and Banks, J. E. (2007). Incorporating ecologically relevant measures of pesticide effect for estimating the compatibility of pesticides and biocontrol agents. *Journal of Economic Entomology*, 100(4), 1027-1032.
- Stevens, P. J., Baker, E. A. and Anderson, N. H. (1988). Factors affecting the foliar absorption and redistribution of pesticides. 2. Physicochemical properties of the active ingredient and the role of surfactant. *Pesticide Science*, 24(1), 31-53.
- Talebi, K., Kavousi, A. and Sabahi, Q. (2008). Impacts of pesticides on arthropod biological control agents. *Pest Technology*, 2(2), 87-97.
- Trostanetsky, A. and Kostyukovsky, M. (2008). Transovarial activity of the chitin synthesis inhibitor novaluron on egg hatch and subsequent development of larvae of *Tribolium castaneum*. *Phytoparasitica*, 36(91), 38-41.
- Wise, J. C., Jenkins, P. E., Vander Poppen, R. and Isaacs, R. (2010). Activity of broad-spectrum and reduced-risk insecticides on various life stages of cranberry fruitworm (Lepidoptera: Pyralidae) in highbush blueberry. *Journal of Economic Entomology*, 103(5), 1720-1728.
- Zotti, M. J., Grutzmacher, A. D., Lopes, I. H. and Smagghe, G. (2013). Comparative effects of insecticides with different mechanisms of action on *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae): Lethal, sublethal and dose-response effects. *Insect science*, 20(6), 743-752.

## CHAPITRE II

### SUBLETHAL EFFECTS OF TWO REDUCED-RISK INSECTICIDES: WHEN THE INVASIVE LADYBEETLE IS DRASTICALLY AFFECTED WHEREAS THE INDIGENOUS NOT

Paula Cabrera<sup>1</sup>, Daniel Cormier<sup>2</sup> et Éric Lucas<sup>3</sup>

Publié dans la revue *Journal of Pest Science*

Cabrera, P<sup>1</sup>, Cormier, D<sup>2</sup>. et Lucas, É<sup>1</sup>. (2018). Sublethal Effects of Two Reduced-risk Insecticides: When the invasive ladybeetle is drastically affected whereas the indigenous not. *Journal of Pest Science*, 91, 1153–1164.

<sup>1</sup>Laboratoire de Lutte Biologique, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, 141 Avenue du Président-Kennedy, Montréal, QC H2X 1Y4, Canada

<sup>2</sup>Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 335 Rang des Vingt Cinq E, Saint-Bruno-de-Montarville, QC J3V 0G7, Canada



## ABSTRACT / RÉSUMÉ

Chlorantraniliprole and novaluron, two reduced-risk insecticides (IRRs), are currently used to control codling moth (*Cydia pomonella*) in apple orchards in southeastern Canada. Reproduction of *Harmonia axyridis* Pallas, an invasive ladybeetle, and the indigenous *Coleomegilla maculata* (DeGeer), both important generalist predators, might be compromised after exposure of adults to these IRRs. The aim of the study was to compare the effects of chlorantraniliprole and novaluron on fecundity and fertility between the two ladybeetles in a laboratory setting. Reproductive mates were given chlorantraniliprole or novaluron treated prey for 24h and reproductive performance was followed during 15 days. Chlorantraniliprole did not affect reproduction of ladybeetles. However, novaluron reduced fecundity, egg hatch and fertility of the invasive ladybeetle *H. axyridis*, by 29, 43 and 78.7 %, respectively, contrasting with no significant effect on the indigenous *C. maculata*. Additionally, *H. axyridis* oviposition pattern was altered by the same insecticide. This resulted in more egg masses containing fewer eggs, compared to the control. No such changes were detected for *C. maculata*. Chlorantraniliprole does not disturb reproduction of *H. axyridis* or *C. maculata*. Treatments of novaluron should have an important effect on populations of the invasive *H. axyridis*, and consequently on the impact of the invader on native ladybeetle species and on its dominance, and finally potentially on biocontrol services provided by the assemblage of ladybeetles.

KEYWORDS: *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, chlorantraniliprole, novaluron, reproduction, invasive species

Le chlorantraniliprole et le novaluron sont deux insecticides à risques réduits (IRRs) utilisés pour lutter contre le carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella* (L.)) dans les vergers de pommiers au sud-est du Canada. La reproduction de deux prédateurs généralistes, la coccinelle envahissante *Harmonia axyridis* Pallas et la coccinelle indigène *Coleomegilla maculata* (DeGeer), pourrait être compromise après l'exposition des adultes à ces IRRs. Le but de cette recherche était de comparer les effets du chlorantraniliprole et du novaluron sur la fécondité et sur la fertilité des deux espèces au laboratoire. Des couples (femelles avec mâles) ont été exposés pendant 24 h à des proies traitées avec les insecticides et la performance reproductive a été évaluée pendant 15 jours. Le chlorantraniliprole n'a pas affecté la reproduction d'aucun des deux prédateurs. Cependant, le novaluron a réduit la fécondité, le taux d'éclosion des œufs et la fertilité de la coccinelle envahissante *H. axyridis* de 29, 43 et 78,7 %, respectivement. De plus, la stratégie de ponte de la coccinelle asiatique a été perturbée par le novaluron ; plus de masses d'œufs, contenant moins d'œufs par rapport au traitement témoin ont été observées. À l'opposé, aucun effet de cet insecticide n'a été observé sur la coccinelle indigène *C. maculata*. Pour le chlorantraniliprole, aucun effet n'a été mis en évidence sur la reproduction de *C. maculata*, ni de *H. axyridis*. En conclusion, les traitements avec le novaluron pourraient avoir un effet important sur les populations de la coccinelle envahissante *H. axyridis* dans les agroécosystèmes, sur sa dominance ainsi que sur les services de contrôle biologique fournis par l'assemblage de coccinelles.

MOTS-CLEFS: *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, chlorantraniliprole, novaluron, reproduction, espèce envahissante

## 2.1. INTRODUCTION

The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* Pallas and the indigenous twelve spotted lady beetle, *Coleomegilla maculata* (DeGeer) (Col., Coccinellidae) are two important generalist predators in eastern Canadian apple orchards. *Harmonia axyridis* is an invasive species, which reached North America in 1916 (Alyokhin and Sewell, 2004; Koch and Galvan, 2008; Lucas *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 2016), South America (1990) (Brown *et al.*, 2011; Koch *et al.*, 2006), South Africa (2006) (Nedvěd *et al.*, 2011; Stals and Prinsloo, 2007), and Europe (1991) (Coutanceau, 2006 ; Roy *et al.*, 2016; Roy and Wajnberg, 2007). First detected in Canadian apple orchards in 1994 (Coderre *et al.*, 1995), the multicolored Asian lady beetle, is currently one of the most abundant coccinellids, as a result of intraguild predation (IGP) and/or exploitative competition with indigenous and previously introduced exotic lady beetles (Gagnon *et al.*, 2011; Koch, 2003; Koch and Galvan, 2008; Lucas, 2005; Lucas, 2012). The indigenous twelve spotted lady beetle is common in several Nearctic crops (Lucas *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2007), and recognized as one of the most polyphagous coccinellids (Hodek and Evans, 2012). Currently, they are at risk of exposure to two reduced risk insecticides, chlorantraniliprole and novaluron, recently adopted to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae) (Cabrera *et al.*, 2014; Cabrera *et al.*, 2017; Cormier and Yelle, 2010). Chlorantraniliprole belongs to a new chemical class of selective insecticides: the anthranilic diamides. This insecticide, mainly intended to control lepidopteran pests, interferes with the insect ryanodine receptors causing cessation of feeding, paralysis of muscle cells and ultimately death of sensitive species (Cordova *et al.*, 2007; Dinter *et al.*, 2008). Novaluron, a benzoylphenyl urea insecticide, is an insect growth regulator and chitin synthesis inhibitor (CSI) (Ishaaya *et al.*, 2011) with a wide spectrum of control against Lepidoptera, Coleoptera, Hemiptera and Diptera

(Ishaaya *et al.*, 1996). Both insecticides act by ingestion and contact, with ovicidal and larvicidal activity (Cormier *et al.*, 2013; Cutler and Scott-Dupree, 2007; Dinter *et al.*, 2008). Cabrera *et al.*, (2017) found that both insecticides caused important mortality to *H. axyridis* and *C. maculata* when larvae were exposed to fresh residues. However, chlorantraniliprole was harmless for both species when eggs and first instar larvae topically contacted the insecticide or when first instar larvae ingested insecticide-contaminated aphids. Interestingly, by topical contact and ingestion, novaluron (at doses recommended for apple orchards in Quebec) was toxic to the invasive *H. axyridis* larvae, whereas it was harmless to the native *C. maculata* larvae. This differential susceptibility could have important consequences for the population dynamics of the assemblage of coccinellids in apple orchards, as well as in other crops where this reduced-risk insecticide is used.

Beyond lethal effect (mortality), insecticides can cause strong sublethal effects on arthropods and these have to be considered in order to assess their total impact (Desneux *et al.*, 2007; Stark and Banks, 2003; Talebi *et al.*, 2008). Sublethal effects are defined as physiological or behavioral effects on individuals surviving to exposure to a particular pesticide dose/concentration. A common sublethal effect of pesticides on natural enemies is their impact on fecundity or/and fertility by altering oviposition or by decreasing egg hatch, and this can have drastic consequences for population dynamics (Croft, 1990). Research about sublethal effects of chlorantraniliprole and novaluron on reproduction of coccinellids, has been done recently. These studies indicate that both insecticides might affect reproduction of coccinellids, depending on the species and insecticide dose (Fernandes *et al.*, 2016; Fernandez, 2015; Moscardini *et al.*, 2015). Thus, the interaction between the invasive *H. axyridis* and *C. maculata*, as well as the coccinellid assemblage and

functional diversity of the aphidophagous guild, could be specially altered if chlorantraniliprole and/or novaluron affect reproduction of these ladybeetles.

The objective of the present study was to evaluate sublethal effects on reproduction of the invasive *H. axyridis* and on the indigenous *C. maculata*, caused by exposure of adults to chlorantraniliprole and novaluron through treated preys, and to compare their relative susceptibility. Based on previous research on lethal effect (Cabrera *et al.*, 2014), where *H. axyridis* was more sensitive to novaluron than *C. maculata*, we hypothesize that novaluron will have a stronger negative effect on the invasive *H. axyridis*, than on the native *C. maculata*.

## 2.2. MATERIALS AND METHODS

### 2.2.1. Insects

Adult ladybeetles were collected in the field in Quebec in 2013. *Harmonia axyridis* individuals were found at Sainte-Agathe (46°23'0.3"N and 71°24'33.5"W) and *C. maculata* originated from Saint-Edmond (45°49'9.8"N and 72°37'16.4"W). These individuals were used to start rearings at Laboratoire de lutte biologique from the Université du Québec à Montréal in a growth chamber at 24°C, 16L: 8D, and 70% RH. Ladybeetles were fed with pollen, sweetened water solution (10 % sugar), and green peach aphids, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hem., Aphididae), reared on potato plants, *Solanum tuberosum* L.

### 2.2.2. Insecticides

A spray volume of 1000 litres ha<sup>-1</sup>, and field rates recommended for apple orchards in Quebec were considered to calculate insecticide concentrations for the bioassay: 50.75 g a.i. ha<sup>-1</sup> chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG, DuPont Canada, Mississauga, ON) and 100 g a.i. ha<sup>-1</sup> novaluron (Rimon® 10 EC, Makhteshim Agan of North America, Raleigh, NC). Thus, concentrations of insecticides were 50.75 mg a.i. litre<sup>-1</sup> chlorantraniliprole and 100 mg a.i. litre<sup>-1</sup> novaluron.

### 2.2.3. Bioassay

Twenty-four hour old reproductive mates were placed individually in 200 cc ventilated containers and fed with 25 mg of *M. persicae* aphids (weighed with an AE 163 Mettler Toledo balance) previously euthanized and treated with a Potter tower (1 ml solution and 2 mg cm<sup>-2</sup> aqueous insecticide deposit) for 24 h. After this period, leftover aphids were removed and insects were fed *ad libitum* with untreated aphids and bee pollen daily, during the entire evaluation period. Treatments were disposed in randomized complete blocks design. Experimental units were individual females enclosed in a container with a male. Date of start of exposure to treated prey (or beginning of assay) was considered the blocking factor. Number of replicates is shown in tables 2.1 and 2.2.

The number of egg clusters, eggs per cluster and egg hatch was recorded daily during 15 days, one week after oviposition in the control group had started, to gather data when oviposition was stable, as described in IOBC guidelines (Schmuck *et al.*, 2000). Egg hatch was assessed during seven days after oviposition by counting

hatched larvae found every day. Mortality of females and males was noted during the test. If one of the mates died before the 7<sup>th</sup> day of data collection, the experimental unit was eliminated from the bioassay.

#### 2.2.4. Effects of insecticides per species

Daily and cumulative mean fecundity and fertility as well as percentage of cumulative egg hatch per female were calculated. Egg hatch proportions were dichotomized to 0 (no egg hatch), and 1 for proportions higher than 0, in order to compare trajectory of egg hatch over time among treatments by means of a mixed effects logistic regression (Collett, 2002).

Effect of insecticides on oviposition pattern represented the effect of insecticides on the number of egg clusters and the number of eggs per egg cluster. An egg cluster was defined as a group of eggs separated from another group of eggs for at least 2 cm. The number of egg clusters as well as the number of eggs per cluster was recorded daily for each female during the entire evaluation period and the average of egg clusters and eggs per cluster were calculated for each treatment.

#### 2.2.5. Comparing effects of insecticides between *H. axyridis* and *C. maculata*.

In order to compare sublethal effects of insecticides between *H. axyridis* and *C. maculata*, reproduction performance results in insecticide groups were expressed relative to the water control group of each species as corrected fecundity, hatching

rate, and fertility. These were obtained by modifying the expression  $(1 - R_t / R_c) * 100\%$  from Heimbach *et al.* (2000), where  $R_t$  and  $R_c$  are the absolute values in the treatment and control groups, respectively.

#### 2.2.5.1. Fecundity

Fecundity for insecticide treatments was corrected respect to the water control of each species with the following formula:

$$\text{Corrected fecundity} = \left( 1 - \left( \frac{\sum_{i=0}^n \left( \frac{\text{Mean of eggs in control} - \text{Eggs in insecticide}}{\text{Mean of eggs in control}} \right)}{n} \right) \right) * 100$$

Where:

**Corrected fecundity** = Difference of cumulative egg (mean) in insecticide treatments relative to the control (%).

**n** = total of females in the insecticide treatment

**Mean of eggs in control** = Mean of eggs laid per female in the control after 15 days.

**Eggs in insecticide** = Number of eggs laid per female in the insecticide treatment after 15 days.

#### 2.2.5.2. Hatching rate

Mean of cumulative egg hatch was corrected respect to the water control with the following formula:



$$\text{Corrected hatching percentage} = \left( 1 - \left( \frac{\sum_{i=0}^n (\text{Mean of h. rate in control} - \text{H. rate in insecticide})}{n} \right) \right) * 100$$

Where:

**Corrected hatching percentage** = Difference of cumulative hatching rate (mean) in the insecticide treatment relative the control (%).

**n** = total of females in the insecticide treatment

**Mean of h. rate in control** = Hatching rate (mean) in the control after 15 days.

**H. rate in insecticide** = Hatching rate in the insecticide treatment for each female after 15 days.

### 2.2.5.3. Fertility

Fertility considers neonate cannibalism that could occur before assessment of hatched larvae. The formula used in the calculations to correct fertility relative to water control in insecticide treatments follows:

$$\text{Corrected viable offspring} = \left( 1 - \left( \frac{\sum_{i=0}^n \left( \frac{\text{Mean of larvae in control} - \text{Larvae in insecticide}}{\text{Mean of larvae in control}} \right)}{n} \right) \right) * 100$$

Where:

**Corrected viable offspring** = Difference of cumulative larvae produced per female (mean) in the insecticide treatment relative to the control (%).

**n** = total of females in the insecticide treatment

**Mean of larvae in control** = Mean of larvae produced per female in the control after 15 days.

**Larvae in insecticide** = Number of larvae produced per female in the insecticide treatment after 15 days.

### 2.2.6. Calculations and statistical analyses

Results were analysed following two steps: 1) an analysis of the impact of insecticides on each species separately; 2) a comparative analysis on the proportional impact of insecticides on the two species.

Fertility (effective reproductive capacity) was measured as the production of viable offspring. Calculations for cumulative fecundity and fertility at 15 days after treatment considered only females that survived 15 days.

One way analysis of variance and the Tukey's test (HSD) were used to detect differences among treatments for daily and cumulative means of fecundity and fertility and cumulative hatching rate for each ladybeetle species. Welch's analysis of variance was used when data did not reach the homoscedasticity assumption. When data did not meet normality, the non-parametric test, Kruskal-Wallis and the Mann Whitney test, were used to detect differences among treatments (Sokal and Rohlf, 1995).

Differences of corrected fecundity, hatching rate and fertility between ladybeetle species for each of the two insecticides were analyzed with the Student's *t* test or the Kruskal-Wallis non-parametric test when data distribution was not normal (Sokal and Rohlf, 1995).

A Logistic Mixed Model with a random intercept (Collett 2002) was used to model probability of egg hatch throughout the time based on a GLIMMIX procedure (SAS Institute, 2016a).

Differences in the mean of egg clusters and number of eggs per cluster were examined by one-way analysis of variance or Kruskal-Wallis and the Wilcoxon each pair test (SAS Institute, 2016b).

Statistical analyses were performed using JMP software v.12.1 (SAS Institute, Cary, NC) and SAS software v.9.4 (SAS Institute, Cary, NC) software.

## 2.3. RESULTS

### 2.3.1. Adult mortality

Overall, adult mortality was scarce. There was no mortality of females in the control or in the novaluron groups for *H. axyridis*. With regards to males, 1.2 % of individuals died in the control and 1.4 % in the novaluron treatment. Mortality in the chlorantraniliprole treatment was 4.9 % females and 2.4 % males. *Coleomegilla maculata* did not show mortality in the control and males and females showed the same mortality rate, of 1.6 %, in insecticide treatments.

### 2.3.2. Sublethal effects on reproduction of each species

#### 2.3.2.1. Fecundity, hatching rate, and fertility

*Coleomegilla maculata* reproduction was not affected by any of the insecticides. Daily ( $F = 0.1724$ ;  $df = 1, 92$ ;  $P = 0.8419$ ) and cumulative ( $F = 0.4339$ ;  $df = 2, 70$ ;  $P = 0.6497$ ) fecundities were not different than their controls. Cumulative hatching rate had the same trend ( $H = 1.111$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.57$ ), and no differences among treatments for daily and cumulated fertility were found ( $H = 0.3965$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.8201$  and  $H = 1.81$ ,  $df = 2$ ;  $P = 0.4033$ ) (Tab. 2.1).

*Harmonia axyridis* reproduction was not affected by chlorantraniliprole, whereas novaluron had a negative effect on fecundity, hatching rate, and fertility (Table 2.2). Daily fecundity was significantly lower in the novaluron treatment than in the control and chlorantraniliprole treatments ( $H = 14.30$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.0008$ ). The same trend was observed for cumulative fecundity per female ( $H = 12.82$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.0016$ ).

Hatching rate was also lower in the novaluron treatment compared to the control and chlorantraniliprole ( $H = 39.64$ ;  $df = 2$ ;  $P < 0.0001$ ). Daily and cumulated fertility were also significantly reduced in the novaluron treatment compared to the control and chlorantraniliprole ( $H = 44.54$ ,  $df = 2$ ;  $P < 0.0001$  and  $H = 42.64$ ,  $df = 2$ ;  $P < 0.0001$ , respectively).

Tableau 2.1 Sublethal effects of chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) on reproduction of *C. maculata* following ingestion of insecticide-treated prey after 15 days (mean  $\pm$  SE).

Treatment	N	Daily mean per female		Cumulative mean per female		
		Fecundity	Fertility	Fecundity	Fertility	% Hatch
Control	31	10.7 $\pm$ 0.8 A	4.9 $\pm$ 0.6 A	166.6 $\pm$ 12.2 A	82.2 $\pm$ 9.3 A	46.8 $\pm$ 4.4 A
Chlorantraniliprole	32	10.1 $\pm$ 0.8 A	4.4 $\pm$ 0.5 A	147.6 $\pm$ 16.4 A	60.9 $\pm$ 8.5 A	41.0 $\pm$ 5.0 A
Novaluron	32	10.2 $\pm$ 0.9 A	5.1 $\pm$ 0.7 A	155.5 $\pm$ 16.0 A	83.0 $\pm$ 12.9 A	47.6 $\pm$ 4.4 A

Fecundity and fertility refer to eggs and larvae produced per female respectively. ANOVA or Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0.05$ .

Tableau 2.2. Sublethal effects of chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) on reproduction of *H. axyridis* following ingestion of insecticide-treated preys after 15 days (mean  $\pm$  SE).

Treatment	N	Daily Mean per female		Cumulative mean per female		
		Fecundity	Fertility	Fecundity	Fertility	% Hatch
Control	43	23.5 $\pm$ 1.3 <b>A</b>	14.1 $\pm$ 1.2 <b>A</b>	348.2 $\pm$ 20.2 <b>A</b>	213.7 $\pm$ 18.7 <b>A</b>	58.5 $\pm$ 3.9 <b>A</b>
Chlorantraniliprole	35	21.5 $\pm$ 1.6 <b>A</b>	14.2 $\pm$ 1.3 <b>A</b>	317.0 $\pm$ 23.0 <b>A</b>	209.2 $\pm$ 18.4 <b>A</b>	63.8 $\pm$ 2.8 <b>A</b>
Novaluron	36	16.4 $\pm$ 1.5 <b>B</b>	3.0 $\pm$ 1.1 <b>B</b>	245.8 $\pm$ 23.6 <b>B</b>	45.5 $\pm$ 16.9 <b>B</b>	15.9 $\pm$ 4.5 <b>B</b>

Means within columns followed by different letters indicate statistically significant differences. Fecundity and fertility refer to eggs and larvae produced per female respectively. (Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0.05$ ).

#### 2.3.2.2. Egg hatch over time

Chlorantraniliprole and novaluron did not affect *C. maculata* egg hatch over time (Fig. 2.1-a; Table 2.3). In the case of *H. axyridis*, chlorantraniliprole did not affect egg hatch either; however, novaluron had a significant negative impact on this variable. Egg hatch was lower than the control at the beginning of the bioassay and it was reduced even more over time, with almost no hatch at 15 days (Fig. 2.1-b; Table 2.4).

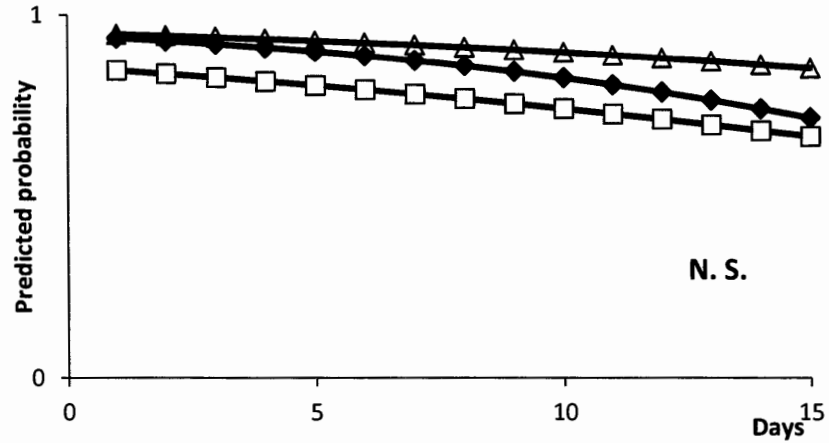
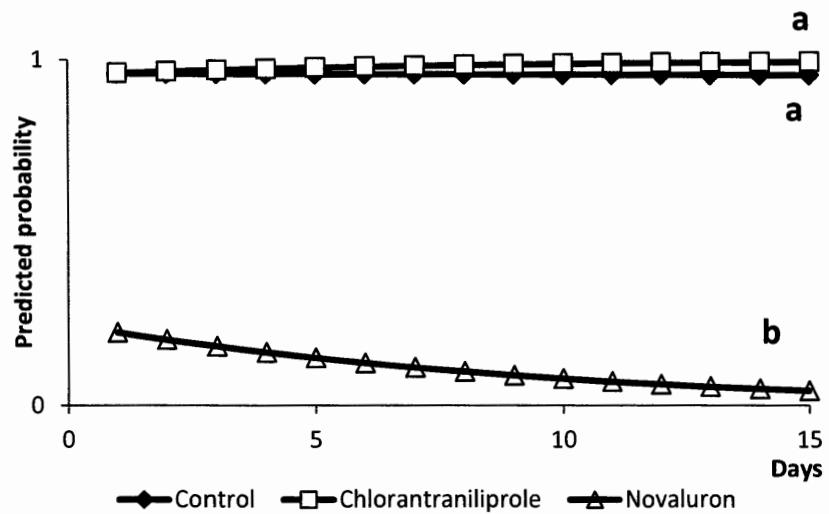
a) *Coleomegilla maculata*b) *Harmonia axyridis*

Figure 2.1. Predicted probability of egg hatch over time in each treatment. *Coleomegilla maculata* (a) and *H. axyridis* (b) following ingestion of preys treated with water, chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG) and novaluron (Rimon® 10 EC) (Logistic Mixed Model with random intercept).

Table 2.3. Logistic Regression Analysis for Fixed effects of egg hatch over time of *H. axyridis* (GLIMMIX procedure,  $\alpha = 0.05$ ).

Effect	Estimate	SE	t Value	Pr >  t	Odds
Intercept	3.17	0.68	4.70	< 0.0001 *	
Time	-0.01	0.06	-0.14	0.8862	0.990
Chlorantraniliprole	-0.09	1.03	-0.08	0.9343	0.914
Novaluron	-4.37	0.92	-4.73	< 0.0001 *	0.013
Time * Chlorantraniliprole	0.14	0.10	1.42	0.1570	
Time * Novaluron	-0.1209	0.08	-1.51	0.1313	

Table 2.4. Logistic Regression Analysis for Fixed effects of egg hatch over time of *C. maculata* (GLIMMIX procedure,  $\alpha = 0.05$ ).

Effect	Estimate	SE	t Value	Pr >  t	Odds
Intercept	2.83	0.51	5.52	< 0.0001 *	
Time	-0.13	0.04	-2.84	0.0046 *	0.878
Chlorantraniliprole	-1.04	0.70	-1.48	0.1381	0.353
Novaluron	0.15	0.77	0.19	0.8487	1.162
Time * Chlorantraniliprole	0.05	0.06	0.87	0.3835	
Time * Novaluron	0.05	0.07	0.66	0.5088	

### 2.3.2.3. Effect on oviposition pattern

For *C. maculata*, in average, cumulative egg clusters per female were 14.5, containing 12.7 eggs each in the control; 12.7 egg clusters with 11.5 eggs each in the chlorantraniliprole group; and 11.7 egg clusters containing 13.2 eggs each in the novaluron treatment. The quantity of egg clusters and the number of eggs per

cluster were not affected by any of the insecticides ( $H = 3.43$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.1798$  and  $F = 0.8618$ ;  $df = 2, 70$ ;  $P = 0.4268$  respectively) (Fig. 2.2-a).

For *H. axyridis*, novaluron drastically affected the oviposition pattern. After 15 days, females had laid a significantly higher average number of egg clusters in this treatment (26.6) compared to the control (17) and chlorantraniliprole (17) ( $H = 7.23$ ;  $df = 2$ ;  $P = 0.0269$ ). The number of eggs per cluster was also significantly lower in the novaluron treatment (13) compared to the control (22) and chlorantraniliprole (19.7) ( $H = 27.12$ ;  $df = 2$ ;  $P < 0.0001$ ) (Fig. 2.2-b).



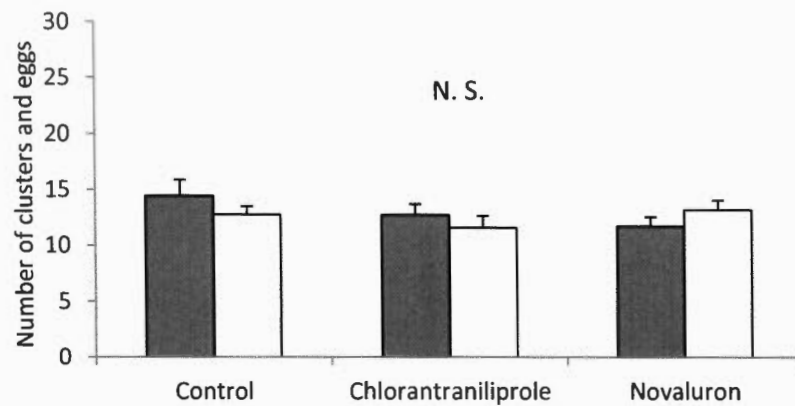
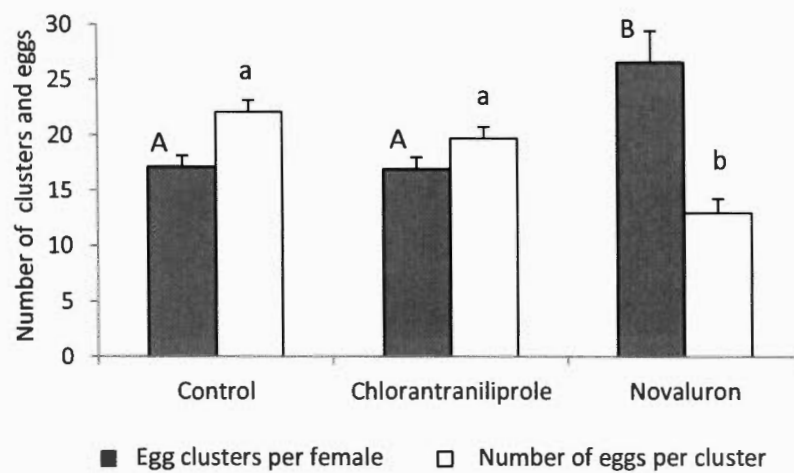
a) *Coleomegilla maculata*b) *Harmonia axyridis*

Figure 2.2. Oviposition pattern (mean  $\pm$  SE): Total number of egg clusters and size of egg clusters for (a) *C. maculata* and (b) *H. axyridis* following ingestion of prey treated with water, chlorantraniliprole (Altacor<sup>®</sup> 35 WG) or novaluron (Rimon<sup>®</sup> 10 EC). (Kruskal-Wallis or ANOVA,  $\alpha = 0.05$ ).

### 2.3.3. Comparative impact of insecticides on reproduction

When comparing the effect of insecticides on fecundity (cumulative eggs per female after 15 days) between species, the effect of chlorantraniliprole on both ladybeetles was not statistically different ( $t = -0.203$ ;  $df = 40.55$ ;  $P = 0.840$ ) (Fig. 2.3-a), although novaluron significantly reduced the fecundity of *H. axyridis* (29.4 % reduction) compared to *C. maculata* (7 %) ( $H = 4.04$ ,  $df = 1$ ;  $P = 0.0443$ ).

Novaluron also caused a significantly stronger reduction of *H. axyridis* hatching rate (43.4 %) compared to *C. maculata* (1.7 %) ( $H = 22.85$ ;  $df = 1$ ;  $P < 0.0001$ ). Chlorantraniliprole reduced by 14.9 % egg hatch of *C. maculata* and there was a 4.3 % increase for *H. axyridis* ( $H = 8.65$ ,  $df = 1$ ;  $P = 0.0033$ ) (Fig. 2.3-b).

Fertility of *H. axyridis* was largely inhibited by novaluron (78.7 % lower than in the control) compared to *C. maculata* fertility (1.0 % higher than in the control) ( $H = 26.90$ ;  $df = 1$ ;  $P < 0.0001$ ) (Fig. 2.3-c). Chlorantraniliprole did not affect fertility of ladybeetles differently ( $H = 2.08$ ;  $df = 1$ ;  $P = 0.1488$ ) (Fig. 2.3-c)

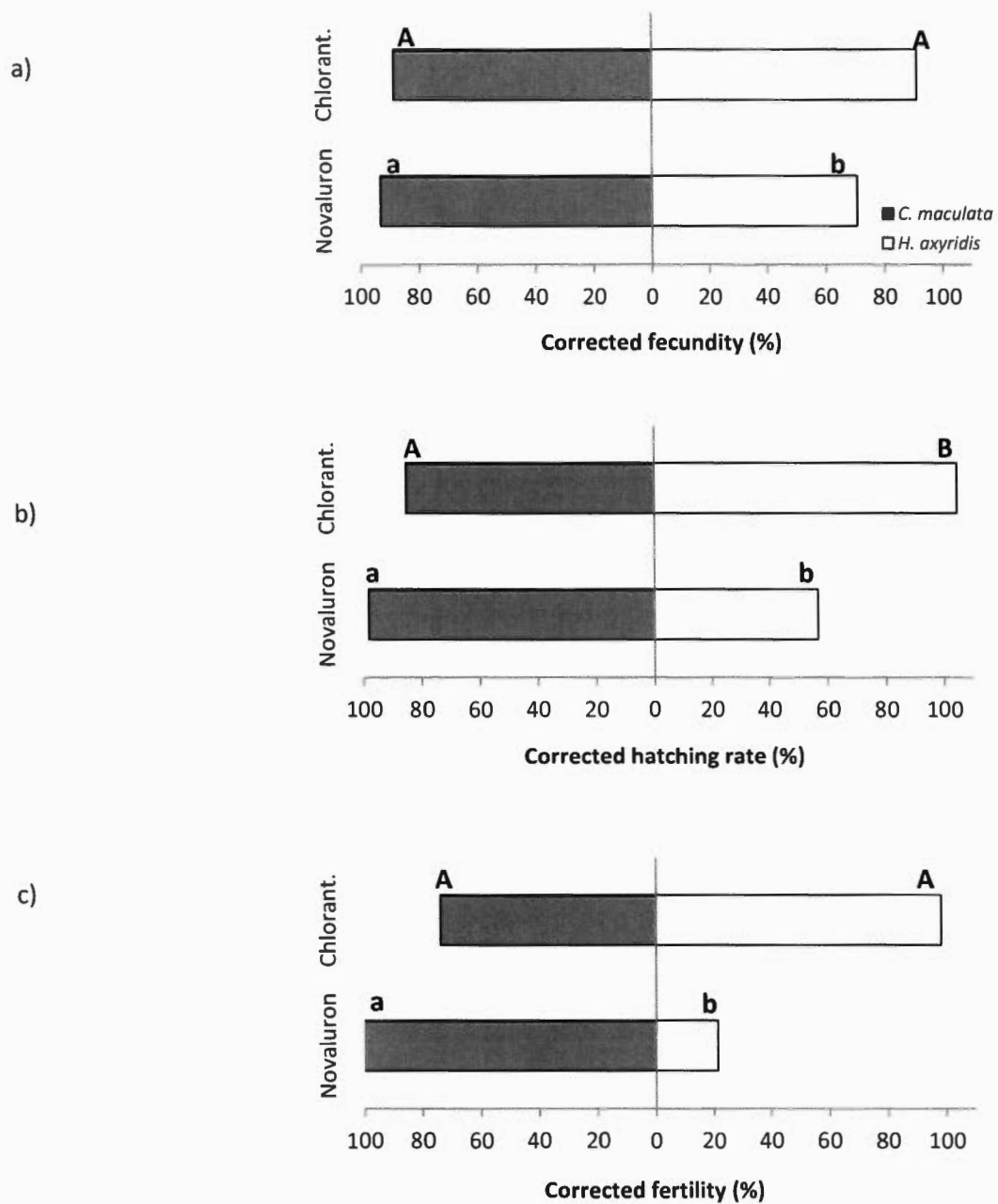


Figure 2.3 Comparative impact of insecticides (relative to their respective control) on *H. axyridis* and *C. maculata*'s reproduction after ingestion of treated prey. Hundred percent fertility represents fertility in water control. a) Cumulative fecundity (eggs per female after 15 days). b) Hatching rate after 15 days. c) Cumulative fertility (larvae per female after 15 days). Different letters indicate statistically significant

differences between species (Kruskal-Wallis or t test,  $\alpha = 0.05$ ). Values higher than 100% are not showed.

## 2.4. DISCUSSION

Our results are in accordance with the hypothesis that the invasive ladybeetle *H. axyridis* is more affected by the reduced-risk insecticide novaluron than the indigenous *C. maculata*. The second pesticide, chlorantraniliprole, did not affect reproduction of neither coccinellid species.

### 2.4.1. Impact of insecticides on each ladybeetle

Innocuousness of chlorantraniliprole on reproduction of the two ladybeetle species found in this study, confirm the selectivity of this reduced-risk insecticide, as it has been recorded in several studies (Brugger *et al.*, 2010; Fernandez, 2015; Preetha *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2015). Nevertheless, these results should be taken with caution, since important effects on both coccinellid species have been found in other investigations. For example, impairment of *H. axyridis* population growth, including reduction of fecundity, has been demonstrated after larvae were topically treated with sublethal concentrations of chlorantraniliprole in China (Nawaz *et al.*, 2017). Additionally, when exposed to fresh residues, this insecticide can cause important mortality to *H. axyridis* and *C. maculata* larvae, at the same dose-concentration tested in the present study (Cabrera *et al.*, 2014; Cabrera *et al.*, 2017).

Concerning novaluron, despite lethal effect on *C. maculata* larvae, after exposure to fresh residues reported in a previous study (Cabrera *et al.*, 2017), our results give evidence that reproduction of this ladybeetle is not affected by novaluron.

The situation is drastically different for the invasive *H. axyridis*. In addition to reduction of fecundity and fertility, novaluron reduced egg hatch during the whole period of assessment, showing no recovery towards normal levels at any point (Fig. 2.1-b). These can be explained by a vertical transmission of the insecticide into the egg during its formation in the female organism, a phenomenon called transovarial transport (Trostanetsky *et al.*, 2015), which is known for the benzoylurea CSIs (Trostanetsky and Kostyukovsky, 2008; Sáenz-de-Cabezón *et al.*, 2012). Accordingly, novaluron has demonstrated to reduce fertility of several insect species (Alyokhin *et al.*, 2009; Amarasekare and Shearer, 2013; Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014; Kostyukovsky and Trostanetsky, 2006). Interference of CSIs with oogenesis and spermatogenesis has also been mentioned in the literature to explain mechanistic processes of fecundity and fertility decreases (Mansur *et al.*, 2010; Romano, 2007). For example, the benzoylurea insecticide lufenuron, has shown to cause reduction of spermatozooids and structural disorganization of follicular cells, yolk reduction and decrease in protein levels in ovarioles of *Anthonomus grandis* Boheman (Col., Curculionidae) (Costa *et al.*, 2017). Unfortunately, results of the present study do not give information about whether novaluron affected *H. axyridis* males and/or females, since both were exposed to novaluron. Novaluron also perturbed the oviposition pattern of *H. axyridis*, as females exposed to the insecticide produced more egg clusters containing less eggs compared to the control (Fig. 2.2-b). Clustering of eggs is considered an adaptive strategy against predation (Lucas, 2012), first by a dilution effect reducing the individual probability of being preyed, second by a concentration of toxic compounds (Agarwala and Yasuda, 2001) acting as dose

dependent (Agarwala and Dixon, 1993) deterrents for predators. Consequently egg clusters containing fewer eggs could have a higher probability of predation.

#### 2.4.2. Comparing insecticide sublethal effects between *C. maculata* and *H. axyridis*.

Novaluron had a different impact on both coccinellid species, since it drastically reduced fertility, hatching rate and fecundity of *H. axyridis*, whereas it did not affect reproduction of *C. maculata*. Inversely, there were not differences in fecundity and fertility between both coccinellids when exposed to chlorantraniliprole. Although hatching rate was lower for *C. maculata* compared to *H. axyridis*, chlorantraniliprole did not affect this variable when compared to the water control group of *C. maculata* (Table 2.1).

Fertility, the most affected reproductive variable of *H. axyridis* by novaluron, decreased by almost 80%, whereas *C. maculata*'s fertility was not reduced. Innate tolerance is one of the factors affecting susceptibility of natural enemies to pesticides, and this has been related to penetration and excretion of compounds, alteration of the target site (Oppenoorth and Welling, 1976), and capacity of detoxification (Croft, 1990). *Harmonia axyridis* and *C. maculata* are both generalist predators belonging to the same family (Coccinellidae). Yet, they have a differential sensitivity to novaluron, a benzoylurea insecticide. Similarly, both species have shown a differential sensitivity to a benzoylhydrazine ecdysone agonist, the insecticide methoxyfenozide. Trisyono *et al.*, (2000) (Trisyono *et al.*, 2000) showed that *C. maculata* larvae and eggs are not affected by methoxyfenozide at 100 or 200 mg a.i. litre<sup>-1</sup> in USA. In another study (European), the same insecticide was toxic to *H. axyridis* larvae applied at 25, 50, and 100 mg a.i. litre<sup>-1</sup> (Carton *et al.*, 2003). A

potential hypothesis to the differential susceptibility of the predators would be dissimilarities in biochemical processes of molting between the two coccinellids. Differences in capacity of detoxification or excretion of toxic compounds by each species might also explain the observed differences. In fact, resistance to the benzoylureas has been measured both in the field and in the laboratory, and it is usually linked to insects acquiring an increased capacity to metabolize and eliminate the compound (Sun *et al.*, 2015). CSIs can be excreted into eggs, and especially into feces (Trostanetsky *et al.*, 2015). This might also indicate that *C. maculata* has a better capacity to excrete and/or detoxify novaluron than *H. axyridis*. Finally, natural enemies can be exposed to toxic plant secondary compounds from their prey or by ingestion of plant constituents, and these can predispose predators to detoxify pesticides (Croft 1990). Both species, *C. maculata* and *H. axyridis*, are considered zoophytophagous (Moser *et al.*, 2008), which implies that both are exposed to secondary metabolites of plants. However, studies comparing phytophagy between both coccinellids have found *C. maculata* to be more phytophagous than *H. axyridis*. Moser *et al.* (2008) found that in a per volume basis, *C. maculata* larvae ingested more corn leaf tissue than *H. axyridis* larvae. The former also fed on seedlings more frequently than *H. axyridis*. The authors concluded that *C. maculata* ingested more plant material, relative to body size, than *H. axyridis*. Another example is pollinivory. Pollen contains toxic secondary metabolites (Detzel and Wink, 1993; Sedivy *et al.*, 2012), and *C. maculata* is a highly pollinivore ladybeetle consuming significantly higher quantities of pollen than *H. axyridis* (Lundgren *et al.*, 2004). Thus, the lower susceptibility of *C. maculata* to novaluron, compared to *H. axyridis*, could be the result of a better detoxifying capacity, evolved from phytophagy. Yet, this hypothesis has to be validated in future studies.

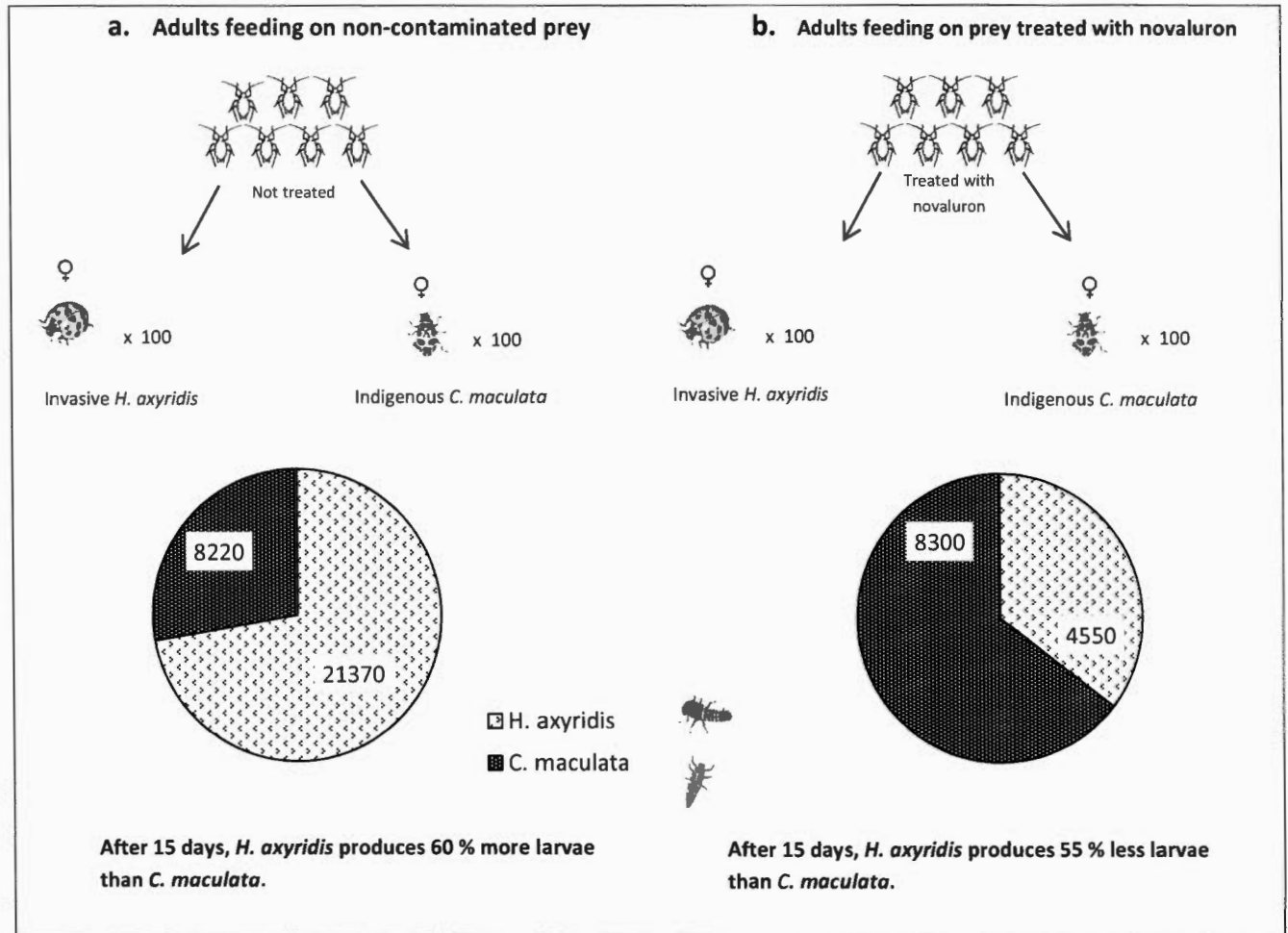


Figure 2.4. Simulation of larval production from 100 females, of *H. axyridis* and *C. maculata*, after 15 days in normal conditions (a) and exposed to prey treated with novaluron (b). Calculations are based on results from tables 1 and 2 assuming there is no neonatal sibling cannibalism.



### 2.4.3. Implications in the field

In addition to its voracity, and its role as an intraguild predator (Brown *et al.*, 2011; Lucas, 2005; Lucas, 2012; Mirande *et al.*, 2015; Roy *et al.*, 2016), the high reproductive capacity of *H. axyridis* (Michaud, 2002; Nedvěd and Honek, 2012) can also contribute to its invasiveness. Because its reproduction is largely reduced by novaluron, a simple simulation, based in our results, can picture the relative impact of this insecticide on *H. axyridis* and *C. maculata* populations. Note that naturally, fertility of *H. axyridis* is almost 60% higher than *C. maculata*'s. After exposure to novaluron, *H. axyridis* females would produce 55% less larvae than *C. maculata* females (Fig. 2.4).

Furthermore, development of offsprings from adults exposed to insecticides can be negatively affected as well, as it has been found for several species exposed to novaluron (Alyokhin *et al.*, 2009; Amarasekare and Shearer 2013; Kim *et al.*, 2011; Kostyukovsky and Trostanetsky, 2006). If novaluron caused an important decrease in *H. axyridis* population, *C. maculata* population, as well as the whole coccinellid assemblage, will be disturbed, consequently affecting the diversity of all natural enemies in the orchard. Consequences on *H. axyridis* reproduction will also be carried outside the apple orchard, since adults having fed on contaminated prey may leave the orchard by flight. Besides, in Quebec apple orchards Rimon® EC 10 (novaluron) is used once during the growing season, in alternation with Altacor® 35 WG (chlorantraniliprole), in order to delay development of insecticide resistance in codling moth. Yet, novaluron is also registered to be used to control insect pests in several other crops in Canada, such as peppers, stone fruits, strawberry, leafy brassica greens, and lowbush cranberry among others. In some of these crops, ladybeetles are important in controlling pests. For example, Rimon® EC 10 is used to

control the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* Say (Col., Chrysomelidae) in potato (Adama Agricultural Solutions, 2015). *Harmonia axyridis* and more specifically *C. maculata* are considered important natural enemies in this culture, preying upon *L. decemlineata* and aphids on potato (Kabaluk *et al.*, 2006; Lucas *et al.*, 2004; Todorova *et al.*, 1996). Rimon® EC 10 is also approved to control the corn earworm, *Helicoverpa zea* Boddie (Lep., Noctuidae), in sweet corn (Adama Agricultural Solutions 2015), where *H. axyridis* and *C. maculata* are also common predators (Lucas *et al.*, 2007). Consequently, considering the invasiveness of the multicolored Asian ladybeetle, we can expect an impact in natural enemy populations in these systems after reduction of *H. axyridis* densities as a result of novaluron treatments. Additionally, preliminary results of ongoing research suggest a lethal effect of novaluron on other natural enemies in apple orchards (Syrphidae, Miridae, and Chrysopidae) (Cabrera P, Cormier D, and Lucas E, unpublished). These findings indicate that combined lethal (Cabrera *et al.*, 2017) and sublethal effects of novaluron strongly and differently affect, not only the two ladybeetle species, but also many species of the natural enemy guilds in apple orchards, the structure and dynamics of these guilds, and consequently should affect the functional diversity and the ecosystemic service of pest biocontrol.

## 2.5. ACKNOWLEDGMENTS

Funding of this project was provided by the regional industry council of Quebec, executing the Canadian Agricultural Adaptation Program for Agriculture and Agri-Food Canada, the Program Prime-Vert from the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food from Quebec, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and Canada Foundation for innovation (CFI). We also want to thank

Jill Vandermeerschen for her advice with statistical analyses, Marc Fournier for his technical support in the laboratory, Franz Vanoosthuysse for the technical support, and all the students for assisting with the ladybeetle rearings and for helping us to take data during long hours in the lab.

## 2.6. REFERENCES

- Adama Agricultural Solutions (2015). RIMON 10 EC Insecticide. Canadian Label, Winnipeg, MB, pp. 26
- Agarwala, B. and Dixon, A. (1993). Why do ladybirds lay eggs in clusters? *Functional Ecology*, 7,541-548
- Agarwala, B. K. and Yasuda, H. (2001). Overlapping oviposition and chemical defense of eggs in two co-occurring species of ladybird predators of aphids. *Journal of Ethology*, 19(1), 47-53
- Alyokhin, A., Guillemette, R. and Choban, R. (2009). Stimulatory and suppressive effects of novaluron on the Colorado potato beetle reproduction. *Journal of economic entomology*, 102(6), 2078-2083
- Alyokhin, A. and Sewell, G. (2004). Changes in a lady beetle community following the establishment of three alien species. *Biological Invasions*, 6(4):463-471
- Amarasekare, K. G. and Shearer, P. W. (2013). Comparing Effects of Insecticides on Two Green Lacewings Species, *Chrysoperla johnsoni* and *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of economic entomology*, 106(3), 1126-1133
- Brown, P. M., Thomas, C. E., Lombaert, E., Jeffries, D.L., Estoup, A. and Handley, L-JL. (2011). The global spread of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae): distribution, dispersal and routes of invasion. *Biocontrol*, 56(4), 623-641

- Brugger, K. E., Cole, P. G., Newman, I. C., Parker, N., Scholz, B., Suvagia, P., . . . Hammond, T. G. (2010). Selectivity of chlorantraniliprole to parasitoid wasps. *Pest Management Science*, 66(10), 1075-1081.
- Cabrera, P., Cormier, D., Fournier, M. and Lucas, É. (2014). Lethal effects of two reduced risk insecticides on *Harmonia axyridis* and *Coleomegilla maculata* (Col., Coccinellidae) following two routes of exposure. *IOBC-WPRS Bulletin*, 103, 41-45.
- Cabrera, P., Cormier, D. and Lucas, É. (2017). Differential Sensitivity of an Invasive and an Indigenous Ladybeetle to Two Reduced-Risk Insecticides. *J Appl Entomol*, DOI: 10.1111/jen.12391
- Carton, B., Smagghe, G. and Tirry, L. (2003). Toxicity of two ecdysone agonists, halofenozide and methoxyfenozide, against the multicoloured Asian lady beetle *Harmonia axyridis* (Col., Coccinellidae). *Journal of Applied Entomology*, 127(4), 240-242
- Coderre, D., Lucas, É. and Gagné, I. (1995). The occurrence of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) in Canada. *The Canadian Entomologist*, 127(4), 609-611.
- Collett, D. (2002). Modelling binary data, CRC press, pp. 408.
- Cordova, D., Benner, E. A., Sacher, M. D., Rauh, J. J. Sopa, J. S.,... Lahm, G. P. (2007) The novel mode of action of anthranilic diamide insecticides: Ryanodine receptor activation. In *Synthesis and Chemistry of Agrochemical VII, Ch 17*; ACS Symposium Series 948 pp. 223-234
- Cormier, D., Pelletier, F. and Chouinard, G. (2013). Residual toxicity of six reduced-risk insecticides to codling moth eggs and neonate larvae. *IOBC-WPRS Bulletin*, 91, 147-151.
- Cormier, D. and Yelle, P. É. (2010). Guide to foliar treatments of apple trees 2010-2011. Québec: Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec
- Costa, H. N., da Cunha, F. M., Cruz, G. S, D'Assunção, C. G., Rolim, G. G.,... Barros, M. E. G. (2017). Lufenuron impact upon *Anthonomus grandis* Boheman

(Coleoptera: Curculionidae) midgut and its reflection in gametogenesis. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 137(Supplement C), 71-80.

- Coutanceau, J.-P. (2006). *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773): une coccinelle asiatique introduite, acclimatée et en extension en France. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 111(3), 395-401.
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. New York : John Wiley and Sons.
- Cutler, G. C. and Scott-Dupree, C. D. ( 2007). Novaluron: Prospects and Limitations in Insect Pest Management. *Pest Technology*, 1(1), 38-46.
- Desneux, N., Decourtye, A. and Delpuech, J. M. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52, 81-106.
- Detzel, A. and Wink, M. (1993). Attraction, deterrence or intoxication of bees (*Apis mellifera*) by plant allelochemicals. *Chemoecology* 4(1), 8-18
- Dinter, A., Brugger, K., Bassi, A., Frost, N. M. and Woodward, M. D. (2008). Chlorantraniliprole (DPX-E2Y45, DuPont™ Rynaxypyr®, Coragen® and Altacor® insecticide) - a novel anthranilic diamide insecticide - demonstrating low toxicity and low risk for beneficial insects and predatory mites. *IOBC-WPRS Bulletin*, 35:128-135
- Fernandes, M. E., Alves, F. M., Pereira, R. C., Aquino, L. A., Fernandes, F. L. and Zanuncio, J. C. (2016). Lethal and sublethal effects of seven insecticides on three beneficial insects in laboratory assays and field trials. *Chemosphere*, 156, 45-55.
- Fernandez, L. (2015). *Lethal and Sublethal Effects of Pesticides Used in Western United States Orchards on Hippodamia convergens*. (Ph.D.). University of California, Berkeley, Ann Arbor. Récupéré de ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Gagnon, A. È., Heimpel, G. E. and Brodeur, J. (2011). The ubiquity of intraguild predation among predatory arthropods. *PLoS One*, 6(11), e28061.

- Heimbach, U., Dohmen, P., Barrett, K. L., Brown, K., Kennedy, P. J.,... Kleiner, R. (2000). A method for testing effects of plant protection products on the carabid beetle *Poecilus cupreus* (Coleoptera, Carabidae) under laboratory and semi-field conditions, In Guidelines to evaluate side-effects of plant protection products to non-target arthropods, ed. by Candolfi MP, International Organization for Biological and Integrated Control of Noxious Animals and Plants, West Palearctic Regional Section (IOBC/WPRS) Gent, pp. 87-106.
- Hodek, I. and Evans, E. W. (2012). Food relationships, In I. Hodek, H. F. Van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)* (p. 110-140). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Ishaaya, I., Lebedev, G., Ghanim, M. and Horowitz, R. (2011). Biorational control of arthropod pests with emphasis on the use of the chitin synthesis inhibitor novaluron. *Pesticides*, 1, 17-22
- Ishaaya I, Yablonski S, Mendelson Z, Mansour Y and Horowitz AR (1996) Novaluron (MCW-275), a novel benzoylphenyl urea, suppressing developing stages of Lepidoptera, white fly and leafminer pests, In *International Conference, British Crop Protection Council*, Brighton, UK p. 1013–1020
- Kabaluk, J. T., Vernon, R. S. and Henderson, D. (2006). Population development of the green peach aphid and beneficial insects in potato fields in British Columbia. *The Canadian Entomologist*, 138(5), 647-660.
- Kim, S. H., Vandervoort, C., Whalon, M. E. and Wise, J. C. (2014). Transovarial transmission of novaluron in *Choristoneura rosaceana* (Lepidoptera: Tortricidae). *The Canadian Entomologist*, 146(3), 347-353.
- Kim, S. H. S., Wise, J. C., Gökçe, A. and Whalon, M. E. (2011). Novaluron causes reduced egg hatch after treating adult codling moths, *Cydia pomonella*: Support for transovarial transfer. *Journal of Insect Science*, 11(1).
- Koch, R. L. (2003). The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: a review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts. *Journal of Insect Science*, 3(32), 1-16.

- Koch, R. L. et Galvan, T. L. (2008). Bad side of a good beetle: the North American experience with *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53(1), 23-35.
- Koch, R. L., Venette, R. C. and Hutchison, W. D. (2006). Invasions by *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae) in the western hemisphere: implications for South America. *Neotropical Entomology*, 35(4), 421-434.
- Kostyukovsky, M. and Trostanetsky, A. (2006). The effect of a new chitin synthesis inhibitor, novaluron, on various developmental stages of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research*, 42: 136-148.
- Lucas, É. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102, 351-364.
- Lucas, É. (2012). Intraguild interactions. Dans I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honèk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 343-374). Chichester : John Wiley & Sons
- Lucas, E., Giroux, S., Demougeot, S., Duchesne, R. M. et Coderre, D. (2004). Compatibility of a natural enemy, *Coleomegilla maculata lengi* (Col., Coccinellidae) and four insecticides used against the Colorado potato beetle (Col., Chrysomelidae). *Journal of Applied Entomology*, 128(3), 233-239
- Lucas, E., Vincent, C., Labrie, G., Chouinard, G., Fournier, F., Pelletier, F., . . . Lafontaine, P. (2007). The multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Quebec agroecosystems ten years after its arrival. *European Journal of Entomology*, 104(4), 737
- Lundgren, J. G., Razzak, A. A. and Wiedenmann, R. N. (2004). Population responses and food consumption by predators *Coleomegilla maculata* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) during anthesis in an Illinois cornfield. *Environmental Entomology*, 33(4), 958-963.
- Mansur, J. F., Figueira-Mansur, J., Santos, A. S., Santos-Junior, H., Ramos, I. B., de Medeiros, M. N., ... Vasconcellos, A. M. H. (2010). The effect of lufenuron, a chitin synthesis inhibitor, on oogenesis of *Rhodnius prolixus*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 98(1), 59-67.

- Michaud, J. (2002). Invasion of the Florida citrus ecosystem by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and asymmetric competition with a native species, *Cycloneda sanguinea*. *Environmental Entomology*, 31(5), 827-835
- Mirande, L., Desneux, N., Haramboure, M. and Schneider, M. I. (2015). Intraguild predation between an exotic and a native coccinellid in Argentina: the role of prey density. *Journal of pest science*, 88(1), 155-162.
- Moscardini, V. F., Gontijo, P. C., Michaud, J. P. et Carvalho, G. A. (2015). Sublethal effects of insecticide seed treatments on two nearctic lady beetles (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecotoxicology*, 24(5), 1152-1161.
- Moser, S. E., Harwood, J. D. and Obrycki, J. J. (2008). Larval feeding on Bt hybrid and non-Bt corn seedlings by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 37(2), 525-533
- Nawaz, M., Cai, W., Jing, Z., Zhou, X., Mabubu, J. I. and Hua, H. (2017). Toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on the development and fecundity of a non-specific predator, the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas). *Chemosphere*, 178, 496-503.
- Nedvěd, O., Háva, J. and Kulíková, D. (2011). Record of the invasive alien ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera, Coccinellidae) from Kenya. *ZooKeys*, 106, 77
- Nedvěd, O. et Honěk, A. (2012). Life history and development. Dans I. Hodek, H. F. Van Emden et A. Honěk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)* (p. 54-109). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Oppenoorth, F. J. and Welling, W. (1976). Biochemistry and Physiology of Resistance, In *Insecticide Biochemistry and Physiology*, Wilkinson, C. F. (dir.)(p. 507-551). Boston, US: Springer
- Preetha, G., Stanley, J., Suresh, S., Kuttalam, S. and Samiyappan, R. (2009). Toxicity of selected insecticides to *Trichogramma chilonis*: assessing their safety in the rice ecosystem. *Phytoparasitica*, 37(3), 209-215.
- Romano, F. C. B. (2007). Ação de alguns inseticidas com propriedades esterilizantes sobre *Spodoptera frugiperda* (JE Smith, 1797)(Lepidoptera: Noctuidae) e seu



predador *Doru luteipes* (Scudder, 1876)(Dermaptera: Forficulidae): Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz

- Roy, H. E., Brown, P. M., Adriaens, T., Berkvens, N., Borges, I., Clusella-Trullas, S., ... Evans, E. W. (2016). The harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*: global perspectives on invasion history and ecology. *Biological Invasions*, 18(4), 997-1044.
- Roy, H. and Wajnberg, E. (2007). From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species. Netherlands: Springer
- Sáenz-de-Cabezón Irigaray, F. J. and Zalom, F. G. (2012). Transovarial biotransference of etoxazole through a terrestrial trophic web. *Pest management science*, 68(11), 1467-1470.
- SAS Institute. (2016a). The GLIMMIX Procedure, In *SAS/STAT® 142 User's Guide*. (p. 3266-3608) Cary, NC
- SAS Institute. (2016b). JMP® 12. Nonparametric. Récupéré de <http://www.jmp.com/support/help/Nonparametric.shtml>.
- Schmuck, R., Candolfi, M. P., Kleiner, R., Mead-Briggs, M., Moll, M.,... Kemmeter, F. (2000). A laboratory test system for assessing effects of plant protection products on the plant dwelling insect *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae), In Guidelines to evaluate side-effects of plant protection products to non-target arthropods, ed. by Candolfi MP, International Organization for Biological and Integrated Control of Noxious Animals and Plants, West Palearctic Regional Section (IOBC/WPRS) Gent, pp. 45-54.
- Sedivy, C., Piskorski, R., Müller, A. and Dorn, S. (2012). Too low to kill: concentration of the secondary metabolite ranunculin in buttercup pollen does not affect bee larval survival. *Journal of chemical ecology*, 38(8), 996-1002.
- Sokal, R. et Rohlf, J. (1995). *Biometry : the principles and practice of statistics in biological research* (3<sup>rd</sup> ed. éd.). New York : New York W. H. Freeman.

- Stals, R. et Prinsloo, G. (2007). Discovery of an alien invasive, predatory insect in South Africa: the multicoloured Asian ladybird beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae). *South African Journal of Science*, 103(3-4), 123-126.
- Stark, J. D. and Banks, J. E. (2003). Population-level effects of pesticides and other toxicants on arthropods. *Annual review of entomology*, 48(1), 505-519.
- Sun, R., Liu, C., Zhang, H. and Wang, Q. (2015). Benzoylurea chitin synthesis inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(31), 6847-6865.
- Talebi, K., Kavousi, A. et Sabahi, Q. (2008). Impacts of pesticides on arthropod biological control agents. *Pest Technology*, 2(2), 87-97.
- Todorova, S. I., Côté, J. C. and Coderre, D. (1996). Evaluation of the effects of two *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin strains on the development of *Coleomegilla maculata lengi* Timberlake (Col., Coccinellidae). *Journal of Applied Entomology*, 120(1-5), 159-163.
- Trisyono, A., Puttler, B. et Chippendale, G. M. (2000). Effect of the ecdysone agonists, methoxyfenozide and tebufenozide, on the lady beetle, *Coleomegilla maculata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 94(1), 103-105.
- Trostanetsky, A. and Kostyukovsky, M. (2008). Note: Transovarial activity of the chitin synthesis inhibitor novaluron on egg hatch and subsequent development of larvae of *Tribolium castaneum*. *Phytoparasitica*, 36(1), 38-41.
- Trostanetsky, A., Kostyukovsky, M. and Quinn, E. (2015). Transovarial effect of novaluron on *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) after termination of direct contact. *Journal of Insect Science*, 15(1).
- Zhang, X., Xu, Q., Lu, W. and Liu, F. (2015). Sublethal effects of four synthetic insecticides on the generalist predator *Cyrtorhinus lividipennis*. *Journal of pest science*, 88(2), 383-392.

### CHAPITRE III

## WHEN AN INSECTICIDE AFFECTS THE ADAPTIVE VALUE OF INTRAGUILD PREDATION BY AN INVADER

Paula Cabrera<sup>1</sup>, Marianne Bessette<sup>1</sup>, Vanessa Cruz<sup>1</sup>, Daniel Cormier<sup>2</sup> and Éric Lucas<sup>1</sup>

Soumis à la revue PlosOne

<sup>1</sup>Laboratoire de Lutte Biologique, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, 141 Avenue du Président-Kennedy, Montréal, QC H2X 1Y4, Canada

<sup>2</sup>Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 335 Rang des Vingt Cinq E, Saint-Bruno-de-Montarville, QC J3V 0G7, Canada

## ABSTRACT / RÉSUMÉ

Biological invasions can generate major ecological disturbances, such as changes in species diversity and structure of communities. It is believed that the Multicolored Asian ladybeetle, *Harmonia axyridis* Pallas (Col, Coccinellidae), recognized as one of the most invasive insects in the world, has reduced native coccinellids populations in several areas and is considered as a threat for biodiversity at large. A significant trait, favoring its invasiveness and its dominance over indigenous ladybeetles, is intraguild predation (IGP). IGP has advantageous adaptive value for individuals, removing competitors, potential predators and providing an alternative nutritive resource when main resources are scarce. Previous research demonstrated that this invasive ladybeetle is highly susceptible to the reduced-risk insecticide novaluron, a chitin synthesis inhibitor, whereas the North American indigenous competitor, *Coleomegilla maculata* DeGeer (Col, Coccinellidae), is not. Our study explores the adaptive value of IGP for each of the two coccinellids after preying on each other's larvae, previously treated with insecticide. Our first hypothesis is that the invasive ladybeetle, susceptible to the insecticide, should lose the adaptive value of IGP, while the native predator not. Our second hypothesis is that the adaptive value of IGP for the invasive predator will be recovered over time, as a result of neutralisation of the insecticide by the intraguild prey (native species). The results support both hypotheses, and show that an insecticide can completely remove the adaptive value of IGP for the invader, while it does not change for the indigenous ladybeetle. Moreover, the study demonstrates that if the intraguild prey (non-susceptible to the insecticide) undergoes molt after being exposed to the insecticide, the adaptive value for the intraguild predator is restored.

KEYWORDS: Intraguild predation, biological invasions, *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, novaluron, reduced risk insecticide

Les invasions biologiques peuvent causer de perturbations écologiques, telles que des changements dans la diversité des espèces et dans la structure des communautés. La coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* (Pallas) (Col, Coccinellidae), est reconnue comme un des insectes le plus envahissants dans le monde. Elle a réduit les populations des coccinelles indigènes dans plusieurs régions et est une menace pour la biodiversité dans un sens plus large. Un des facteurs clef expliquant son succès d'invasion, est la prédation intraguilde (IGP) qu'elle exerce sur les espèces indigènes. L'IGP possède une valeur adaptative importante pour les individus la pratiquant, car des compétiteurs et/ou des prédateurs potentiels sont supprimés et le prédateur obtient une ressource nutritive alternative quand la ressource principale est limitée. Dans des études précédentes, il a été démontré que la coccinelle envahissante est extrêmement susceptible à l'insecticide à risques réduits novaluron, un inhibiteur de synthèse de la chitine, tandis que son compétiteur indigène, *Coleomegilla maculata* De Geer (Col, Coccinellidae), l'est beaucoup moins. Cette étude présente la valeur adaptative de l'IGP pour chacun des prédateurs lorsqu'il s'attaque à l'autre prédateur contaminé ou non par l'insecticide. Notre première hypothèse est que la coccinelle envahissante, reconnue susceptible, devrait perdre la valeur adaptative de l'IGP en raison de sa sensibilité aux toxines présentes dans la proie. Notre seconde hypothèse est qu'après une certaine période, la valeur de l'IGP va remonter pour l'envahisseur, car la proie intraguilde aura neutralisé la toxine. Nos résultats confirment les deux hypothèses précédentes et montrent que l'IGP n'a plus aucune valeur lorsque l'envahisseur s'attaque à une

proie intragilde contaminée. Nos résultats démontrent que si la proie intragilde (non susceptible) se rend jusqu'au stade suivant (après la mue), la valeur adaptative de l'IGP pour l'envahisseur est restaurée. Des conséquences pour les communautés et pour les services écosystémiques sont discutées.

MOTS-CLEFS: *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*, insecticide à risques réduits, novaluron, prédation intragilde, invasion biologique

### 3.1. INTRODUCTION

Biological invasions can interfere with several ecological and evolutionary processes (Mooney and Cleland, 2001), such as changes in species diversity and structure of communities (Strayer *et al.*, 2006), affecting ecosystem services and causing huge economic losses (Pejchar and Mooney, 2009; Vilà *et al.*, 2010; Walsh *et al.*, 2016). Some of the traits that characterize invasive species are high adaptability to changes in the environment, high fecundity and dispersion (Kolar and Lodge, 2001; Sakai *et al.*, 2001), and broad diet range (Crowder and Snyder, 2010; Evans *et al.*, 2011; Snyder and Evans, 2006). Another factor contributing to the success of invaders is competitive ability, and more specifically intraguild predation (IGP) (Eubanks *et al.*, 2002; Guedes *et al.*, 2017; Michaud, 2012; Pell *et al.*, 2008; Snyder *et al.*, 2004). IGP is defined as the predation on a competitor (Polis and Holt, 1992), and confers adaptive advantages for the intraguild predator. These include removal of competitors, removal of potential predators, and an alternative nutritive resource

when main resources (extraguild prey) are scarce. Therefore, IGP has important consequences for the distribution, abundance, and evolution of species involved (intraguild predator, intraguild prey and shared resource) (Polis *et al.*, 1989) as well as for applied topics such as conservation management and biological control (Müller and Brodeur, 2002; Rosenheim *et al.*, 1995).

The Multicolored Asian ladybeetle, *Harmonia axyridis* Pallas (Col., Coccinellidae), which is as a successful biocontrol agent in Asia, its native region (Pervez and Omkar, 2006) is widely recognized as one of the most invasive insects on the world (Brown *et al.*, 2011; Snyder and Evans, 2006; Vandereycken *et al.*, 2012) and it has been introduced in numerous ecosystems worldwide (Brown *et al.*, 2011; Coderre *et al.*, 1995; Coutanceau, 2006; Gordon, 1985; Lucas *et al.*, 2007; Nedvěd *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2008; Stals and Prinsloo, 2007; Tedders and Schaefer, 1994). As an invasive species, it has caused adverse impacts on the wine industry (by altering wine quality) (Ker *et al.*, 2005; Linder *et al.*, 2009; Pickering *et al.*, 2008) and as a household invader during winter (Huelsman *et al.*, 2002, Wang *et al.*, 2011). It is an effective generalist predator of numerous hemipteran pests (Koch and Galvan, 2008), with higher fertility and fecundity than competitive ladybeetle species (Michaud, 2002; Santos *et al.*, 2013; Soares *et al.*, 2008), significant adaptability and resilience (Brown *et al.*, 2008), and has a dominant role as an intraguild predator (Brown *et al.*, 2015; Lucas 2005, 2012; Mirande *et al.*, 2015; Ware *et al.*, 2009). These attributes suit the Multicolored Asian ladybeetle to be a top predator according to several experts (Hautier *et al.*, 2011). Consequently, it has reduced diversity of natural enemies in certain regions, especially ladybeetles, (Koch and Galvan, 2008) through exploitative competition and intraguild predation (Hautier *et al.*, 2008; Lucas, 2012; Michaud, 2002; Roy and Wajnberg, 2008).

The Twelve spotted ladybeetle, *Coleomegilla maculata* (DeGeer) (Col., Coccinellidae), is one of the sympatric competitors of *H. axyridis*, in Nearctic apple orchards (Fréchette *et al.*, 2008) as well as in other agricultural ecosystems, such as potato (Kabaluk *et al.*, 2006; Lucas *et al.*, 2004) and sweet corn (Lucas *et al.*, 2007). This ladybeetle, is an indigenous generalist predator in North America, and an important biocontrol agent in various crops (Cottrell and Yeargan, 1998; Fréchette *et al.*, 2008; Lucas *et al.*, 2004; Lundgren *et al.*, 2004) that also participates in IGP with other coccinellids. Thus, both coccinellids, *C. maculata* and *H. axyridis*, frequently engage in mutual IGP (Gagnon *et al.*, 2011).

Although IGP has an important adaptive value for the intraguild predator, it also involves certain risks, such as the risk of injuries or an increase of exposure to pesticides (Provost *et al.*, 2003b). Moreover, it has been proposed that 75 % of the biodiversity might be concentrated in agricultural landscapes and thus, species are exposed to pesticides used for plant protection (Lucas and Maisonhaute, 2014). Most studies have focused on lethal effects of pesticides on pests and on their natural enemies (Guedes *et al.*, 2017). Increasing attention is being given to sublethal effects of pesticides, but very few studies have addressed the impact of pesticides on IGP (Provost *et al.*, 2003a; Provost *et al.*, 2003b). Although pesticides can affect communities' behavioral interactions with potential consequences for biological invasions (Guedes *et al.*, 2016), it remains difficult to establish how pesticide applications may affect success of invasive species using IGP as competitive arm. Sublethal effects of pesticides are defined as physiological or behavioral effects on individuals that survive exposure to a pesticide. Thus, sublethal dose-concentrations do not cause apparent mortality on the experimental population (Desneux *et al.*, 2007). Novaluron (Rimon® EC 10) is considered a reduced-risk insecticide (RRI), this means that it has at least one of six advantageous traits over



conventional pesticides (EPA, 2018) Novaluron is a chitin synthesis inhibitor (Cutler and Scott-Dupree, 2007), used to control the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae), a major pest in Quebec apple orchards (Morin *et al.*, 2017). This IRR has differential lethal and sublethal effects on the invasive Multicolored Asian ladybeetle compared to the *indigenous* Twelve spotted ladybeetle. The invasive ladybeetle is considerably more susceptible to the insecticide than its indigenous intraguild competitor (Cabrera *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2018). Once exposed to insecticides, insects can overcome the effects of toxic compounds by tolerating them or neutralizing them by several mechanisms, such as sequestration, excretion and detoxification (Dowd *et al.*, 1983), and these can determine differences in susceptibilities to pesticides among natural enemies (Croft, 1990).

The aims of this study are 1) to compare the adaptive value of mutual IGP, for the two coccinellids, the invasive and the indigenous species, when the IGP prey faced the effect of exposure to an insecticide used in the invaded area; and 2) to investigate if the effect of the exposure on the adaptive value of IGP can disappear over time through neutralisation of the insecticide by the intraguild prey, the least susceptible species (the indigenous) to novaluron. We hypothesize that the adaptive value of IGP, for the indigenous tolerant Twelve spotted ladybeetle, will be maintained in the presence of the insecticide, whereas it will be greatly reduced for the susceptible invasive ladybeetle. We also hypothesize that the adaptive value of IGP for the susceptible invasive species will be recovered, after a period of time, when the indigenous IG prey will have neutralized the insecticide. In other words, when the IG prey will have overcome the toxicity of the insecticide. Although we do not know what mechanisms are involved, these might be excretion or detoxification.

## 3.2. Materials and Methods

### 3.2.1. Insects

Laboratory rearings of *C. maculata* and *H. axyridis* originated from ladybeetle adults collected in the field in Quebec in 2016 at Sainte-Agathe (46°23'0.3"N and 71°24'33.5"W). New individuals coming from the field were added every year to the rearings. These were in a growth chamber at 24°C, 16L: 8D, and 70% RH at Laboratoire de Lutte Biologique from the Université du Québec à Montréal. Insects were provided with pollen, sweetened water solution (10 % sugar), and green peach aphids, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hem., Aphididae), reared on potato plants, *Solanum tuberosum* L.

### 3.2.2. Insecticide

The insecticide Rimon® 10 EC (Makhteshim Agan of North America, Raleigh, NC) was used in all bioassays at a field rate recommended for apple orchards in Quebec (100 g a.i. ha<sup>-1</sup>). The spray volume most used by apple growers (1000 litres ha<sup>-1</sup>) was considered to calculate concentrations for bioassays: 100 mg a.i. litre<sup>-1</sup> novaluron.

### 3.2.3. Bioassays

A first bioassay was intended to assess the effect of novaluron on intraguild predation by both coccinellid species on the other one. A second bioassay was

performed to explore neutralisation of pesticide by the indigenous *C. maculata* as an intraguild prey, and its effect on the invasive *H. axyridis* as the intraguild predator.

### 3.2.3.1. Effect of the insecticide on intraguild predation

Experimental units consisted in a newly molted second instar *C. maculata* or *H. axyridis* larvae (intraguild predator), individually weighted, and placed in 5 cm Petri dishes with 5 first instar larvae from the opposite ladybeetle species (intraguild prey), previously treated with novaluron or water with a Potter Tower (1 ml solution and 2 mg cm<sup>-2</sup> aqueous insecticide deposit) and killed by freezing to avoid cannibalism (and thawed for 3 min at 20°C before the bioassay) (Fig. 3.1). Each experimental unit was replicated 17 times. Intraguild predators and prey were left together during 24 h. Leftovers of intraguild prey were noted and removed afterwards. After that, intraguild predators were fed with *M. persicae* aphids daily until the adult stage. Mortality and stage of development were noted on a daily basis. Once the individuals became adults, they were weighted again.

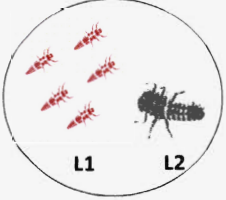
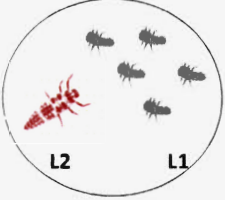
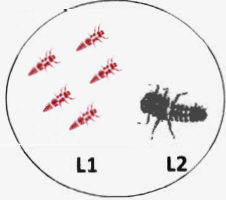
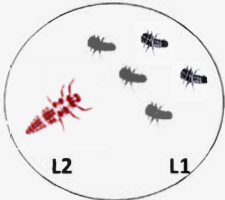
Intraguild predator (L2)	<i>C. maculata</i>	<i>H. axyridis</i>
Intraguild prey (L1)	<i>H. axyridis</i>	<i>C. maculata</i>
Intraguild prey treated with water		
Intraguild prey treated with insecticide (novaluron)		

Figure 3.1 Experimental design used to assess the effect of novaluron on IGP. Each experimental unit consisted of a second instar larva (intraguild predator) placed with five 1<sup>st</sup> instar newly hatched larvae from the opposite coccinellid species. Each experimental unit was replicated 17 times.

### 3.2.3.2. Neutralisation of the insecticide by the indigenous intraguild prey, *C. maculata*, and its effect on the invasive intraguild predator *H. axyridis*.

Three treatments, representing three situations of neutralisation of the insecticide by the intraguild prey, were considered in this bioassay:

- a) **T0**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated, and immediately killed. Intraguild prey does not have time to neutralize the insecticide
- b) **T-24h**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and killed 24 h after. Intraguild prey has 24 hours to neutralize the insecticide.
- c) **T-Molt**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and killed after molt to 2<sup>nd</sup> instar. Intraguild prey has more than 24 h to neutralize the insecticide and undergoes molt.

Additionally, three treatments were associated to each of the treatments mentioned above;

1- **XG-Water**: Aphids treated with water, representing optimal extraguild prey, and offered *ad libitum* to intraguild predators,

2- **IG-Water**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous LB, treated with water, and

3- **IG-Insecticide**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous LB, treated with the insecticide (novaluron).

A Potter tower was used to treat larvae (1 ml solution and 2 mg/cm<sup>2</sup> aqueous insecticide deposit). All preys were weighted prior to freezing. Experimental units were replicated 12 times and consisted of five *C. maculata* larvae, thawed during 3 min at 20°C, and placed in a 5 cm Petri dish with a newly molted 3<sup>rd</sup> instar *H. axyridis* larva, previously starved during 24 h. Third instar larvae were used as intraguild predators in this bioassay, in order to encourage IGP by reducing the prey/predator body mass ratio. Intraguild predators were in contact with extraguild and intraguild prey during 24 h. Intraguild and extraguild prey leftovers were noted and removed

afterwards and intraguild predators were fed with fresh green peach aphids daily until reaching the adult stage. Mortality was assessed daily and *H. axyridis* individuals were weighted after reaching adult stage.

#### 3.2.4. Calculations and statistical analyses

Differences in frequencies of mortality in both bioassays were evaluated with a Chi<sup>2</sup> test ( $\alpha = 0.05$ ) (Sokal and Rohlf, 1995), and pairwise comparisons, with Bonferroni corrections of the *p* value, were performed to detect differences among treatments (McDonald, 2014). Results are presented as mortality percentages. Survival was analysed by means of Kaplan-Meier Survival Analysis and a Proportional Hazard model to detect differences among groups (Kleinbaum and Klein, 2012).

Voracity of the intraguild predator was calculated by assessing 1<sup>st</sup> instar larvae (intraguild prey) leftovers after 24 h of IGP. Mass of consumed prey (mg) was estimated from percentages of leftover prey and weight of prey before freezing (for the neutralisation of the insecticide by the intraguild prey section). Weight increase of intraguild predators until the adult stage was calculated subtracting initial larval weight from final adult weight (g). Weight, as well as voracity, were analysed with independent samples Student's *t* test ( $\alpha = 0.05$ ) in order to investigate the effect of novaluron on both ladybeetle species. Analysis of Variance and the Tukey test or the non-parametric Wilcoxon test and the Steel-Dwass All Pairs test ( $\alpha = 0.05$ ) (SAS Institute, 2015) was used to detect differences among treatments in the case of neutralisation by intraguild prey on *H. axyridis*, since data did not always meet the normality assumption. Time of development of *C. maculata* as the intraguild predator, in the first bioassay, was examined with independent samples Student's *t*

test ( $\alpha = 0.05$ ) (Sokal and Rohlf, 1995) and time of development of *H. axyridis* in the second bioassay was investigated with the Wilcoxon test ( $\alpha = 0.05$ ) (SAS Institute, 2015). JMP software v.12.1 (SAS Institute, Cary, NC) was used to perform all statistical analyses.

### 3.3. RESULTS

#### 3.3.1. Effect of the insecticide on intraguild predation

##### 3.3.1.1. Voracity of intraguild predators

There were no differences in voracity between the insecticide treatment and the control ( $t_{(30.99)} = 1.469$ ,  $p = 0.152$ ) for the indigenous ladybeetle. A different trend was found for the invasive ladybeetle. Less prey was ingested in the insecticide treatment than in the control ( $t_{(29.37)} = -2.283$ ,  $p = 0.029$ ) (Table 3.1).

Table 3.1 Voracity of intraguild predators after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide. Comparisons within lines. Student t test ( $p < 0.05$ )

	Intraguild prey consumed (% $\pm$ SE)	
	Control	Insecticide
Indigenous ladybeetle	42.81 $\pm$ 7.27 A	58.06 $\pm$ 7.41 A
Invasive ladybeetle	61.56 $\pm$ 7.33 a	40.00 $\pm$ 5.96 b

### 3.3.1.2. Mortality-survival of intraguild predators

After feeding on intraguild prey (first instar invasive ladybeetle) treated with novaluron, mortality of indigenous ladybeetle second instar larvae, was not different than the control ( $\chi^2_{(1)} = 0.01$ ,  $p = 0.908$ ) (Fig 3.2-a). Surviving individuals molted normally and completed development until the adult stage. In the case of the invasive ladybeetle, all larvae died after IGP in the novaluron treatment, in which mortality was significantly higher than in the control ( $\chi^2_{(1)} = 15.24$ ,  $p < 0.0001$ ) (Fig 3.2-b). Survival analysis for intraguild predators, preying on intraguild prey treated with the insecticide, reveals a significant difference between survivals of both species over time ( $\chi^2_{(1)} = 12.73$ ,  $p = 0.0004$ ). All invasive ladybeetle larvae died between the first and fifth day following IGP and none of the predators were able to molt before death, whereas 70% of indigenous individuals reached the adult stage (Fig 3.2-d). No significant differences were detected for survival between both ladybeetles species in the control (Fig 3.2-c).



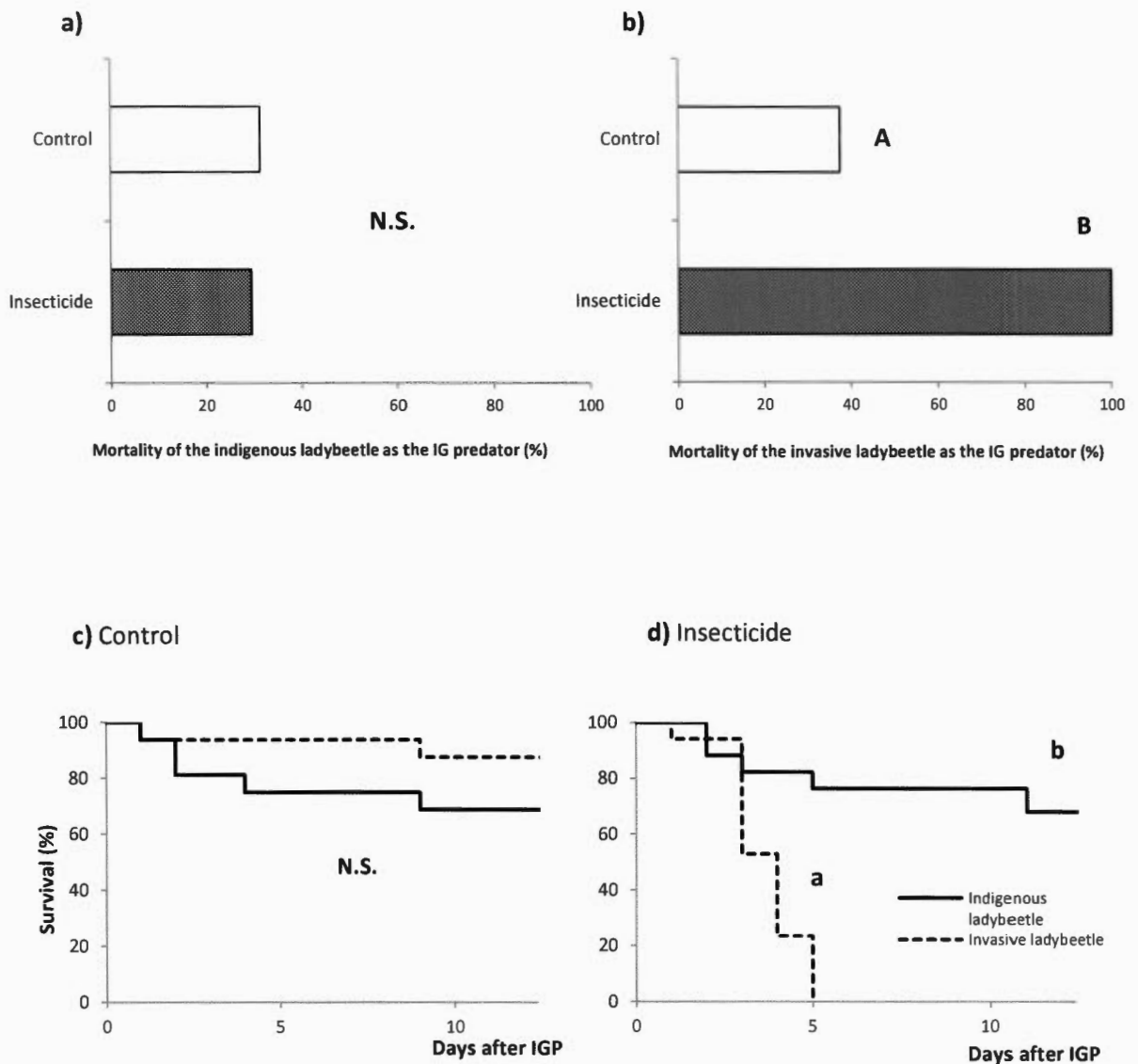


Figure 3.2 a) Mortality of the indigenous ladybeetle as the intraguild predator, b) Mortality of the invasive ladybeetle as the intraguild predator, after 24 h exposure of 2<sup>nd</sup> instar larvae (intraguild preys) to water or insecticide-treated preys.  $\chi^2$  ( $p < 0.05$ ), c) Survival and time of death of intraguild predators after ingestion of

intraguild prey treated with water and d) treated with the insecticide. Kaplan-Meier survival curves ( $p < 0.05$ ).

#### 3.3.1.3. Developmental time and weight increase (indigenous ladybeetle)

Since all invasive ladybeetle individuals in the insecticide treatment died at the second larval instar, results of time of development and weight increase were obtained only for the indigenous ladybeetle in this treatment. Developmental time until adult stage, after IGP, for the twelve spotted ladybeetle, in the insecticide treatment, was not different than the control ( $t_{(21)} = 0.622$ ,  $p = 0.541$ ) (Fig 3.3-a).

Weight increase was not statistically different between the control and novaluron treatments ( $t_{(17.97)} = 2.08$ ,  $p = 0.052$ ) (Fig. 3.3-b).

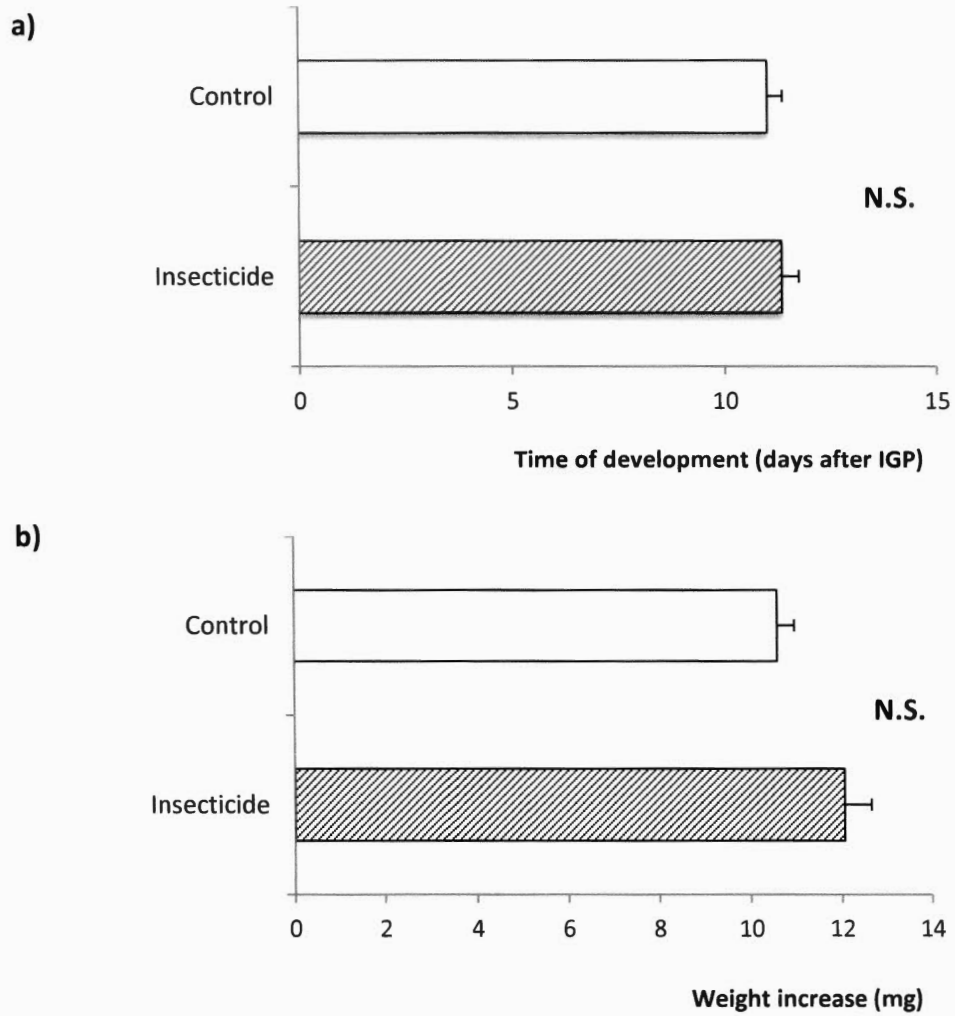


Figure 3.3 a) Time of development (days + SE) and b) weight increase (mg  $\pm$  SE) of the indigenous ladybeetle, from 2<sup>nd</sup> instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide. Student t test ( $p < 0.05$ )

### 3.3.2. Neutralisation of the insecticide by the indigenous intraguild prey and its effect on the invasive intraguild predator.

#### 3.3.2.1. Voracity of the invasive ladybeetle

The invasive ladybeetle consumed similar proportions of intraguild prey treated with water in the three treatments:  $\chi^2_{(1)} = 5.0$ ,  $p = 0.082$ . When comparing voracity of the invasive ladybeetle preying upon the indigenous ladybeetle treated with novaluron, among the three treatments, there were slightly more intraguild preys consumed in the T0 treatment compared to the other treatments. However the T-24h treatment was not different from T-Molt:  $F_{(2)} = 11.12$ ,  $p = 0.0002$  (Table 3.2).

Table 3.2. Voracity of the invasive *H. axyridis* after 24h preying upon extraguild (XG) and intraguild (IG) prey treated with insecticide or water. Comparisons are done within lines. ANOVA or Wilcoxon test ( $p < 0.05$ ).

Treatment	Consumed prey (mg $\pm$ SE)		
	T0	T-24h	T-Molt
XG-Water	7.37 $\pm$ 1.95 a	9.76 $\pm$ 1.20 a	7.79 $\pm$ 0.93 a
IG-Water	0.77 $\pm$ 0.10 A	0.92 $\pm$ 0.17 A	1.16 $\pm$ 0.18 A
IG-Insecticide	1.07 $\pm$ 0.05 A'	0.40 $\pm$ 0.04 B'	0.69 $\pm$ 0.16 B'

### 3.3.2.2. Mortality-survival of the invasive ladybeetle as the intraguild predator

Mortality of the invasive *H. axyridis* was not different among the three neutralisation treatments (T0, T-24h and T-Molt), when consuming water-treated extraguild prey (green peach aphids):  $\chi^2_{(2)} = 0.31$ ,  $p = 0.851$ . Similarly, no differences were found among treatments when intraguild predators consumed the indigenous *C. maculata* first instar larvae treated with water ( $\chi^2_{(2)} = 0.85$ ,  $p = 0.652$ ). However, when comparing mortality frequencies of the invasive ladybeetle after feeding on the indigenous ladybeetle treated with novaluron, the T-Molt treatment showed significantly less mortality ( $\chi^2_{(1)} = 23.22$ ,  $p < 0.0001$ ; T-24h vs T-Molt:  $\chi^2_{(1)} = 13.55$ ,  $p = 0.0002$ ; T0 vs T-Molt:  $\chi^2_{(1)} = 13.38$ ,  $p = 0.0003$ ) (Bonferroni  $\alpha = 0.025$ ). Moreover, it was found that intraguild predators feeding on prey treated with novaluron in treatments T0 and T-24h had a higher mortality than their controls of extraguild prey and intraguild prey treated with water ( $\chi^2_{(1)} = 20.28$ ,  $p < 0.0001$ ; T0-IG-Insecticide vs T0-XG-Water:  $\chi^2_{(1)} = 14.4$ ,  $p = 0.0001$ ; T0-IG-Insecticide vs T0-IG-Water:  $\chi^2_{(1)} = 17.14$ ,  $p < 0.0001$  and  $\chi^2_{(1)} = 19.21$ ,  $p < 0.0001$ ; T-24h-IG-Insecticide vs T-24h-XG-Water:  $\chi^2_{(1)} = 16.22$ ,  $p < 0.0001$ ; T-24h-IG-Insecticide vs T-24h-IG-Water:  $\chi^2_{(1)} = 13.55$ ,  $p = 0.0002$ , Bonferroni  $\alpha = 0.017$  respectively ) (Fig 3.4-a).

A comparison of survival of the invasive ladybeetle over time among the three neutralisation treatments, after IGP on prey treated with novaluron, showed that 70 % of individuals in the T-Molt treatment became adults, whereas all individuals died in treatments T0 and T-24h before nine days (Fig 3.4-b). The Proportional Hazard Model indicated that this difference was significant:  $\chi^2_{(2)} = 19.91$ ,  $p < 0.0001$ . Moreover, individuals in T0/IG-Insecticide were  $\pm 15$  times more prone to die than individuals in T-Molt/IG-Insecticide ( $p < 0.0001$ ). Similarly, larvae in T-24h/IG-

Insecticide had  $\pm 11$  times probabilities of death than larvae in T-Molt-IG-Insecticide ( $p = 0.0002$ ).

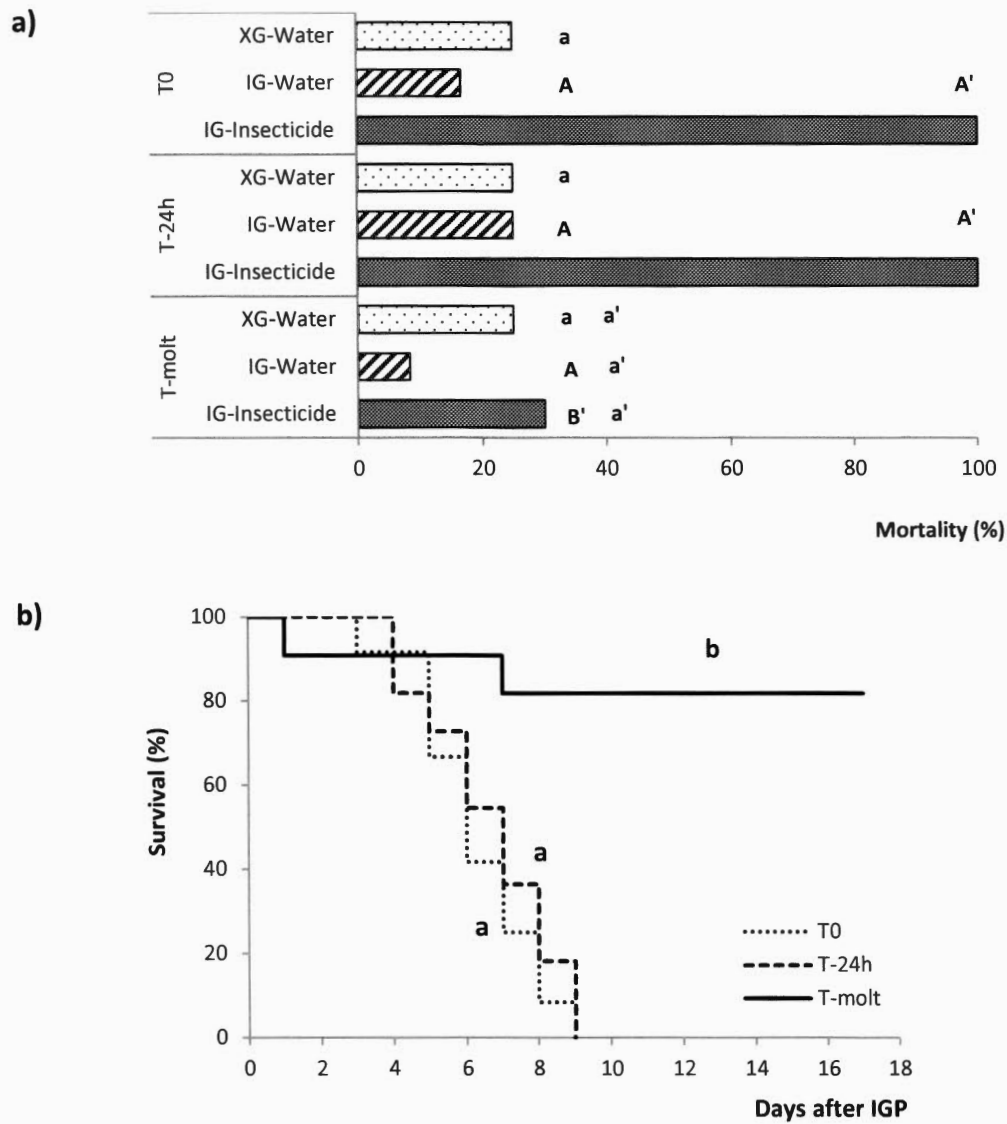


Figure 3.4 a) Mortality of the invasive ladybeetle (intraguild predator), after 24 h exposure of 3<sup>rd</sup> instar larvae to water or insecticide-treated intraguild preys (IG-

Water and IG-Insecticide respectively), and for extraguild prey treated with water (XG-Water) in treatments of neutralisation of the insecticide by the intraguild prey ( $\text{Chi}^2$  ( $\alpha = 0.05$ )) and b) survival of intraguild predators after ingestion of intraguild prey treated with insecticide in three neutralisation treatments. Kaplan-Meier survival curves ( $p < 0.05$ ). **T0**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated, and immediately euthanized; **T-24h**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized 24 h after; **T-Molt**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized after molt to 2<sup>nd</sup> instar; **XG-Water**: Aphids treated with water; **IG-Water**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with water; **IG-Insecticide**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with insecticide (novaluron).

### 3.3.2.3. Time of development and weight increase of the invasive ladybeetle

Data from T0 and T-24h with treated intraguild preys are absent, since no individual reached the adult stage. No significant differences among treatments were found in the time of development after IGP, from third instar to adult stage:  $X^2_{(6)} = 1.16$ ,  $p = 0.98$  (Fig 3.5-a).

Similarly to time of development, no significant differences were detected in weight increase among treatments:  $X^2_{(6)} = 11.93$ ,  $p = 0.064$  (Fig 3.5-b).

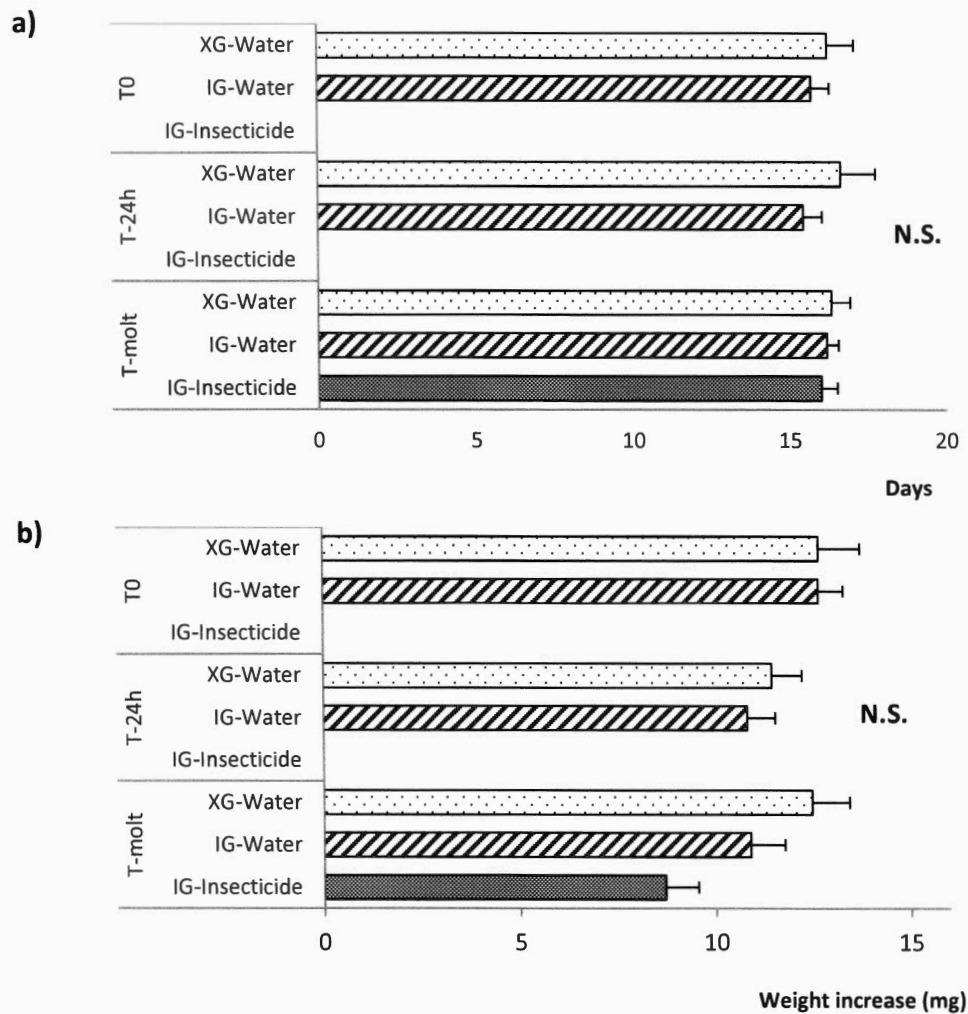


Figure 3.5. a) Time of development (days) of the invasive *H. axyridis*, from 3<sup>rd</sup> instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with water or insecticide and extraguild prey; b) Weight increase (mg) of *H. axyridis* from third instar larvae until adult stage, after 24 h feeding on intraguild prey treated with insecticide or water and extraguild prey. Wilcoxon test ( $\alpha = 0.05$ ). **T0**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated, and immediately euthanized; **T-24h**: first instar larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized 24 h after; **T-Molt**: first instar



larvae of the indigenous ladybeetle or aphids, insecticide or water treated and euthanized after molt to 2<sup>nd</sup> instar; **XG-Water**: Aphids treated with water; **IG-Water**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with water; **IG-Insecticide**: 1<sup>st</sup> instar larvae of the indigenous ladybeetle, treated with insecticide (novaluron).

### 3.4. DISCUSSION

#### 3.4.1. Effect of the insecticide on the adaptive value of IGP for the invasive and the indigenous predators

Our results support our 1<sup>st</sup> hypothesis that the adaptive value of IGP, for the invasive *H. axyridis*, is completely lost when preying on intraguild prey treated with the insecticide. Furthermore, it is in accordance with previous research, confirming a differential susceptibility of both predator species to the reduced risk insecticide novaluron (Cabrera *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2018). At the opposite, after preying on intraguild insecticide-treated prey during 24 h, the adaptive value of IGP was maintained for the tolerant indigenous *C. maculata*. Survival success was not different than survival in absence of the insecticide and neither voracity and weight increase, nor developmental time, were altered.

IGP is particularly advantageous for the adaptive value of intraguild predators, by removing competitors and potential predators, gaining energy and nutrition and consequently surviving, developing and reproducing when extraguild prey densities are low (Polis *et al.*, 1989). For instance, pollen is consumed by coccinellids at the beginning of the growing season in temperate regions, when prey densities are low, but in general it does not allow maturation of ovaries, therefore IGP is beneficial at

that period (Lucas, 2012). Additionally, by the end of the season, IGP can help immature stages of predators to reach the adult stage, which is the overwintering stage in ladybeetles (Hodeck, 2012; Labrie *et al.*, 2008). However, our results show that an insecticide can drastically alter the outcome of IGP and even, completely cancel out its adaptive value for the intraguild predator.

Intraguild prey containing novaluron do not deter the invasive ladybeetle from consuming it and therefore, mortality is devastating for this insect after being exposed to contaminated prey for only 24 h. Which means that, in presence of novaluron, IGP is no longer an advantage for this predator. The adaptive value is completely lost and IGP becomes a highly risky behaviour, which it is not the case for the indigenous *C. maculata*. Thus, consequences of IGP between both, the indigenous and the invasive ladybeetles are reversed by the insecticide.

At a population level, a shift in the dominance of species on the coccinellid assemblage might be expected, particularly under conditions favoring IGP, such as scarcity of extraguild prey (Lucas *et al.*, 1998; Lucas and Rosenheim, 2011) or habitats with little structure (Finke and Denno, 2002; Janssen *et al.*, 2007). In this context, an insecticide might reduce populations of an invasive species, releasing populations of indigenous coccinellids as well as other natural enemies. Declines of natural enemies of Hemipterans, especially indigenous lady beetles in several regions where *H. axyridis* has established, have been attributed to interspecific competition for resources and the strong intraguild predation abilities of this invasive species (Pell *et al.*, 2008). Yet, the outcome of these repercussions in communities will depend on susceptibilities of intraguild members to the toxic compound, in populations. Responses to insecticides, such as potential interactions among non-target organisms, at a population level, including shifts in species

dominance and structure of communities, have been discussed in a recent review (Guedes *et al.*, 2017).

#### 3.4.2. Neutralisation of intraguild prey and its effect on the intraguild predator

Our second hypothesis stating that the adaptive value of IGP, lost as a consequence of intraguild prey contamination by an insecticide, is recovered over time is also supported by the results. This might be linked to neutralisation of the compound by the intraguild prey. Survival of the intraguild predator is significantly higher after feeding on contaminated intraguild prey having molted to the next stage compared to intraguild prey more recently treated. Results of voracity show that this finding is not due to a lower consumption of treated intraguild prey compared to the T-24h treatment. Weight increase of the intraguild predator, after predation on treated intraguild prey does not differ from weight increase after consumption of extraguild prey or intraguild prey treated with water in the highest intraguild prey neutralisation situation. The same trend is observed for the time of development of the intraguild predator. Therefore, benefits of intraguild predation are recovered over time.

Several phenomena may explain predator susceptibility to insecticides, among these, penetration, absorption and neutralisation may be significant. Penetration through the cuticle and rate of absorption of the compound in the arthropod body following topical contact or gut wall after ingestion may differ among species (Croft, 1990; Cutler and Scott-Dupree, 2007). Neutralisation can also be different among species. Toxic compounds can be neutralized by insects through sequestration (storage of compounds in an unaltered form), increased rates of excretion (removal of the toxic substance without altering its integrity) and detoxification (biochemical

transformation of the compound in a way that it will not harm the insect) (Dowd *et al.*, 1983). Although we do not know how these mechanisms are involved, we formulate two hypotheses that might explain the recovery of the adaptive value of IGP by the intraguild predator over time: a) molt associated mechanisms: low penetration of the insecticide through the cuticle/gut wall of the intraguild prey, which is shed during the next molt. Low penetration through the cuticle of other benzoylureas, such as diflubenzuron, has been shown in the literature (Medina *et al.*, 2007). Then, molt can be an opportunity for the insect to eliminate toxic compounds from their bodies; or/and b) excretion and/or detoxification of the insecticide by the intraguild prey, occurring over time. Detoxification and excretion affect susceptibility of natural enemies to pesticides (Croft, 1990; Oppenoorth *et al.*, 1976) and increased capacity to metabolize and eliminate the toxic compound has been associated to the development of resistance to benzoylureas (Kostyukovsky and Trostanetsky, 2006). Thus, the outcome of IGP for the intraguild predator depends on the time that has passed, after exposure of the intraguild prey to the insecticide, specifically the time that is required for the intraguild prey to shed the contaminated cuticle or/and neutralise the insecticide to levels that will not harm the predator. The ability of the indigenous *C. maculata* to neutralize the insecticide could be explained by a preadaptation to deal with toxic secondary plant compounds, since this species seems to be more phytophagous than the invasive *H. axyridis* (Lundgren *et al.*, 2004; Moser *et al.*, 2008). This hypothesis has already been mentioned in previous articles (Cabrera *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2018) but must be tested in future research.

The present investigation suggests that pesticide regime should be taken in consideration when assessing the ecological impact of invasive species in a new environment. Studies of lethal and sublethal effects of compounds used in the

environment involved, as well as effects on behaviour of invaders and intraguild interactions at a population level, should be envisaged. Our research also highlights the side effects of reduced-risk insecticides (novaluron) on beneficial organisms and potentially on invasive species and their ecological consequences. Novaluron is a larvicide with a broad spectrum of activity on several insects (Kostyukovsky and Trostanetsky, 2006) and it is highly toxic for the invasive *H. axyridis* (Cabrera *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2018), as well as for other natural enemies found orchards, such as the lacewing *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neur., Chrysopidae), the predatory plant bug *Deraeocoris brevis* (Uhler) (Hem., Miridae), the ladybeetle *Hippodamia convergens* Guérin-Ménéville (Col., Coccinellidae), and the mite predators *Galendromus occidentalis* (Nesbitt) (Mills *et al.*, 2016) and *Neoseiulus fallacis* (Garman) (Aca., Phytoseiidae) (Lefebvre *et al.*, 2012).

However, certain natural enemies are less susceptible to it, as it is the case of *C. maculata* (Cabrera *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2018) and the parasitoid *Aphelinus mali* (Hald.) (Hym., Aphelinidae) (Mills *et al.*, 2016). Accordingly, as mentioned in 4.1., impact of IGP on coccinellid assemblages, as well as on aphidophagous guilds facing pesticides will be determined by the variability of susceptibilities among guild members as well as neutralisation of toxic compounds by intraguild preys.

Moreover, insecticides can modify the composition of guilds, altering occurrences of competitors (Guedes *et al.*, 2016), which changes the dynamics of the guild and the frequency of encounters for IGP. Our results suggest that direct and indirect effects of insecticide treatments in agroecosystems are likely to have important impacts on ecosystem services of guilds, particularly on biocontrol by interfering with IGP.

The present study highlights the impact of an insecticide on an adaptive behaviour for a top predator, which is one of the key factors associated to the invasive status

of the Multicolored Asian ladybeetle worldwide. At an ecological level, our findings show that an insecticide might alter not only guild composition but also disturb intraguild interactions and consequently alter cascade effects in trophic systems.

### 3.5. ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Jill Vandermeersch for her advice with statistics, Franz Vanoosthuysse for technical support, and Chloé Savoie, Maryse Pelletier, Mathieu Lemieux, and Marie Elen Dupuis for assisting with ladybeetle bioassays.

### 3.6. REFERENCES

- Brown, P. M., Thomas, C. E., Lombaert, E., Jeffries, D. L., Estoup, A., and Handley, L.-J. L. (2011). The global spread of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae): distribution, dispersal and routes of invasion. *Biocontrol*, 56(4), 623-641.
- Brown, P. M. J., Adriaens, T., Bathon, H., Cuppen, J., Goldarazena, A., Hägg, T., . . . Loomans, A. J. M. (2008). *Harmonia axyridis* in Europe: spread and distribution of a non-native coccinellid. *BioControl*, 53(1), 5-21.
- Brown, P. M. J., Ingels, B., Wheatley, A., Rhule, E. L., De Clercq, P., Van Leeuwen, T. and Thomas, A. (2015). Intraguild predation by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) on native insects in Europe: molecular detection from field samples. *Entomological science*, 18(1), 130-133.
- Cabrera, P., Cormier, D. and Lucas, É. (2017). Differential Sensitivity of an Invasive and an Indigenous Ladybeetle to Two Reduced-Risk Insecticides. *Journal of Applied Entomology*. 141(9), 690–701.

- Cabrera, P., Cormier, D. and Lucas, É. (2018). Sublethal Effects of Two Reduced-risk Insecticides: When the invasive ladybeetle is drastically affected whereas the indigenous not. *Journal of Pest Science*. 91(3): 1153–1164
- Coderre, D., Lucas, É. and Gagné, I. (1995). The occurrence of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) in Canada. *The Canadian Entomologist*, 127(4), 609-611.
- Cottrell, T. E. and Yeargan, K. V. (1998). Intraguild predation between an introduced lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), and a native lady beetle, *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 159-163.
- Coutanceau, J.-P. (2006). *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773): une coccinelle asiatique introduite, acclimatée et en extension en France. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 111(3), 395-401.
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. New York : John Wiley and Sons.
- Crowder, D. W. and Snyder, W. E. (2010). Eating their way to the top? Mechanisms underlying the success of invasive insect generalist predators. *Biological Invasions*, 12(9), 2857-2876.
- Cutler, G. C. and Scott-Dupree, C. D. (2007). Novaluron: Prospects and Limitations in Insect Pest Management. *Pest Technology*, 1(1), 38-46.
- Desneux N, Decourtye A and Delpuech JM. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81-106.
- Dowd, P. F., Smith, M. C. and Sparks, T. C. (1983). Detoxification of plant toxins by insects. *Insect Biochemistry*, 13(5), 453-468.
- Eubanks, M. D., Blackwell, S. A., Parrish, C. J., Delamar, Z. D. and Hull-Sanders, and H. (2002). Intraguild predation of beneficial arthropods by red imported fire ants in cotton. *Environmental Entomology*, 31(6), 1168-1174.

- EPA. (2018). Conventional Reduced Risk Pesticide Program. Recovered from <https://www.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program>
- Evans, E. W., Soares, A. O. and Yasuda, H. (2011). Invasions by ladybugs, ladybirds, and other predatory beetles. *BioControl*, 56(4), 597-611.
- Finke, D. L. and Denno, R. F. (2002). Intraguild predation diminished in complex-structured vegetation: implications for prey suppression. *Ecology*, 83(3), 643-652.
- Fréchette, B., Cormier, D., Chouinard, G., Vanoosthuyse, F. and Lucas, E. (2008). Apple aphid, *Aphis spp.* (Hemiptera: Aphididae), and predator populations in an apple orchard at the non-bearing stage: The impact of ground cover and cultivar. *European Journal of Entomology*, 105, 521-529.
- Gagnon, A.-È., Heimpel, G. E. and Brodeur, J. (2011). The ubiquity of intraguild predation among predatory arthropods. *PLoS One*, 6(11), e28061.
- Gordon, R. D. (1985). The Coccinellidae (Coleoptera) of America north of Mexico. *Journal of the New York Entomological Society*, 93(1).
- Guedes, R. N. C., Smagghe, G., Stark, J. D., and Desneux, N. (2016). Pesticide-Induced Stress in Arthropod Pests for Optimized Integrated Pest Management Programs. *Annual Review of Entomology*, 61: 43-62.
- Guedes, R.N.C., Walse, S.S., and Throne, J.E. (2017). Sublethal exposure, insecticide resistance, and community stress. *Current Opinion in Insect Science*, 21, 47-53.
- Hautier, L., Grégoire, J.-C., de Schauwers, J., San Martin, G., Callier, P., Jansen, J.-P. and de Biseau, J.-C. (2008). Intraguild predation by *Harmonia axyridis* on coccinellids revealed by exogenous alkaloid sequestration. *Chemoecology*, 18(3), 191-196.
- Hautier, L., San Martin, G., Callier, P., de Biseau, J.-C. and Grégoire, J.-C. (2011). Alkaloids provide evidence of intraguild predation on native coccinellids by *Harmonia axyridis* in the field. *Biological Invasions*, 13(8), 1805-1814.



- Hodek, I. (2012). Diapause/Dormancy. In I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles* (p. 275-342). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Huelsman, M., Kovach, J., Jasinski, J., Young, C. and Eisley, B. (2002). Multicolored Asian lady beetle (*Harmonia axyridis*) as a nuisance pest in households in Ohio, pp. 243-250. In, Proceedings of 4th international conference on urban pests,. In Jones.
- Janssen, A., Sabelis, M. W., Magalhães, S., Montserrat, M. and Van der Hammen, T. (2007). Habitat structure affects intraguild predation. *Ecology*, 88(11), 2713-2719.
- Kabaluk, J., Vernon, R. and Henderson, D. (2006). Population development of the green peach aphid and beneficial insects in potato fields in British Columbia. *The Canadian Entomologist*, 138(05), 647-660.
- Ker, K. W., Pickering, G. J. and Dris, R. (2005). *Biology and control of the novel grapevine pest-The multicolored Asian lady beetle Harmonia axyridis* (p. 991-997) : WFL Publisher Helsinki, Finland.
- Kleinbaum, D. G. and Klein, M. (2012). *Survival Analysis : A Self-Learning Text* (3<sup>rd</sup> éd.). New York : Springer.
- Koch, R. L. and Galvan, T. L. (2008). Bad side of a good beetle: the North American experience with *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53(1), 23-35.
- Kolar, C. S. and Lodge, D. M. (2001). Progress in invasion biology: predicting invaders. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(4), 199-204.
- Kostyukovsky, M. and Trostanetsky, A. (2006). The effect of a new chitin synthesis inhibitor, novaluron, on various developmental stages of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research*, 42: 136-148.
- Labrie, G., Coderre, D. and Lucas, E. (2008). Overwintering strategy of multicolored Asian lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae): cold-free space as a factor of invasive success. *Annals of the Entomological Society of America*, 101(5), 860-866.

- Lefebvre, M., Bostanian, N. J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. A. and Hardman, J. M. (2012). Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Journal of Economic Entomology*, 105(3), 866-871.
- Linder, C., Lorenzini, F. and Kehrl, P. (2009). Potential impact of processed *Harmonia axyridis* on the taste of 'Chasselas' and 'Pinot noir' wines. *Vitis*, 48(2), 101-102.
- Lucas, E. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102, 351-364.
- Lucas, E. (2012). Intraguild interactions. Dans I. Hodek, H. F. van Emden and A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 343-374). Chichester : John Wiley & Sons.
- Lucas, E., Coderre, D. and Brodeur, J. (1998). Intraguild predation among aphid predators: Characterization and influence of extraguild prey density. *Ecology*, 79(3), 1084-1092.
- Lucas, E., Giroux, S., Demougeot, S., Duchesne, R. M. and Coderre, D. (2004). Compatibility of a natural enemy, *Coleomegilla maculata lengi* (Col., Coccinellidae) and four insecticides used against the Colorado potato beetle (Col., Chrysomelidae). *Journal of Applied Entomology*, 128(3), 233-239.
- Lucas, E. and Maisonhaute, J.-E. (2014). Paysage et services écosystémiques, une nouvelle dimension dans la lutte aux insectes nuisibles. Dans J. Ruiz et G. Domon (dir.), *Agriculture et paysage, Aménager autrement les territoires ruraux* (p. 175-196). Les Presses de l'Université de Montréal.
- Lucas, É. and Rosenheim, J. A. (2011). Influence of extraguild prey density on intraguild predation by heteropteran predators: A review of the evidence and a case study. *Biological Control*, 59(1), 61-67.
- Lucas, E., Vincent, C., Labrie, G., Chouinard, G., Fournier, F., Pelletier, F., . . . Lafontaine, P. (2007). The multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Quebec agroecosystems ten years after its arrival. *European Journal of Entomology*, 104(4), 737.

- Lundgren, J. G., Razzak, A. A. and Wiedenmann, R. N. (2004). Population responses and food consumption by predators *Coleomegilla maculata* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) during anthesis in an Illinois cornfield. *Environmental Entomology*, 33(4), 958-963.
- McDonald, J. H. (2014). *Handbook of Biological Statistics. Chi-square test of independence*. Récupéré de <http://www.biostathandbook.com/chiind.html>
- Michaud, J. P. (2002). Invasion of the Florida Citrus Ecosystem by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and Asymmetric Competition with a Native Species, *Cycloneda sanguinea*. *Environmental Entomology*, 31(5), 827-835.
- Medina, P., Smaghe, G., Budia, F., Del Estal, P., Tirry, L. and Viñuela, E. (2002). Significance of penetration, excretion, and transovarial uptake to toxicity of three insect growth regulators in predatory lacewing adults. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*. 51: 91-101.
- Michaud, J. P. (2012). Coccinellids in biological control. Dans I. Hodek, H. F. and van Emden (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae)* (p. 488-519). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Mills, N. J., Beers, E. H., Shearer, P. W., Unruh, T. R. and Amarasekare, K. G. (2016). Comparative analysis of pesticide effects on natural enemies in western orchards: A synthesis of laboratory bioassay data. *Biological Control*, 102, 17-25.
- Mirande, L., Desneux, N., Haramboure, M. and Schneider, M. (2015). Intraguild predation between an exotic and a native coccinellid in Argentina: the role of prey density. *Journal of Pest Science*, 88(1), 155-162.
- Mooney, H. A. and Cleland, E. E. (2001). The evolutionary impact of invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(10), 5446-5451.
- Morin, Y., Cormier, D. and Chouinard, G. (2017). Le carpocapse de la pomme. Fiche 76. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Moser, S. E., Harwood, J. D. and Obrycki, J. J. (2008). Larval feeding on Bt hybrid and non-Bt corn seedlings by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and

- Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 37(2), 525-533.
- Müller, C. B., and Brodeur, J. (2002). Intraguild predation in biological control and conservation biology. *Biological Control*, 25(3), 216-223.
- Nedvěd, O., Háva, J. and Kulíková, D. (2011). Record of the invasive alien ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera, Coccinellidae) from Kenya. *ZooKeys*, 106, 77.
- Oppenoorth, F. J. and Welling, W. (1976). Biochemistry and Physiology of Resistance, In *Insecticide Biochemistry and Physiology*, Wilkinson, C. F. (dir.)(p. 507-551). Boston, US: Springer
- Pejchar, L. and Mooney, H. A. (2009). Invasive species, ecosystem services and human well-being. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 497-504.
- Pell, J. K., Baverstock, J., Roy, H. E., Ware, R. L. and Majerus, M. E. N. (2008). Intraguild predation involving *Harmonia axyridis* : a review of current knowledge and future perspectives. Dans H. E. Roy et E. Wajnberg (dir.), *From Biological Control to Invasion: the Ladybird Harmonia axyridis as a Model Species* (p. 147-168): Springer Netherlands.
- Pervez, A. and Omkar. (2006). Ecology and biological control application of multicoloured Asian ladybird, *Harmonia axyridis*: A review. *Biocontrol Science and Technology*, 16(2): 111-128.
- Pickering, G., Spink, M., Kotseridis, Y., Brindle, I., Sears, M. and Inglis, D. (2008). The influence of *Harmonia axyridis* morbidity on 2-Isopropyl-3-methoxy-pyrazine in 'Cabernet Sauvignon' wine. *Vitis*, 47(4), 227-230.
- Polis, G. A. and Holt, R. D. (1992). Intraguild Predation - The Dynamics of Complex Trophic Interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 7(5), 151-154.
- Polis, G. A., Myers, C. A. and Holt, R. D. (1989). The Ecology and Evolution of Intraguild Predation - Potential Competitors That Eat Each Other. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 297-330.

- Provost, C., Coderre, D., Lucas, E. and Bostanian, N. J. (2003a). Impact d'une dose subletale de lambda-cyhalothrine sur les predateurs intraguilides d'acariens phytophages en verger de pommiers. *Phytoprotection*, *84*, 105-113.
- Provost, C., Coderre, D., Lucas, É. and Bostanian, N. J. (2003b). Impact of Lambda-cyhalothrin on Intraguild Predation Among Three Mite Predators. *Environmental Entomology*, *32*(2), 256-263.
- Rosenheim, J. A., Kaya, H. K., Ehler, L. E., Marois, J. J. and Jaffee, B. A. (1995). Intraguild Predation Among Biological-Control Agents: Theory and Evidence. *Biological Control*, *5*(3), 303-335.
- Roy, H. and Wajnberg, E. (2008). From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species. *BioControl*, *53*(1), 1-4.
- Roy, H. E., Brown, P. M. J., Adriaens, T., Berkvens, N., Borges, I., Clusella-Trullas, S., . . . Zhao, Z. (2016). The harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*: global perspectives on invasion history and ecology. *Biological Invasions*, *18*(4), 997-1044.
- Sakai, A. K., Allendorf, F. W., Holt, J. S., Lodge, D. M., Molofsky, J., With, K. A., . . . Ellstrand, N. C. (2001). The population biology of invasive species. *Annual review of ecology and systematics*, *32*(1), 305-332.
- Santos, L. D. C. D., Santos-Cividanes, T. M. D., Cividanes, F. J. and Matos, S. T. S. D. (2013). Biological aspects of *Harmonia axyridis* in comparison with *Cycloneda sanguinea* and *Hippodamia convergens*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *48*(11), 1419-1425.
- SAS Institute. (2015). *JMP Nonparametric*. Récupéré de <http://www.jmp.com/support/help/Nonparametric.shtml>
- Snyder, W. E., Clevenger, G. M. and Eigenbrode, S. D. (2004). Intraguild predation and successful invasion by introduced ladybird beetles. *Oecologia*, *140*(4), 559-565.
- Snyder, W. E. and Evans, E. W. (2006). Ecological effects of invasive arthropod generalist predators. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *37*, 95-122.

- Soares, A. O., Borges, I., Borges, P. A., Labrie, G. and Lucas, E. (2008). *Harmonia axyridis*: What will stop the invader? *BioControl*, 53(1), 127-145.
- Sokal, R. and Rohlf, J. (1995). *Biometry : the principles and practice of statistics in biological research* (3<sup>rd</sup> ed. éd.). New York : New York W. H. Freeman.
- Stals, R. and Prinsloo, G. (2007). Discovery of an alien invasive, predatory insect in South Africa: the multicoloured Asian ladybird beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae). *South African Journal of Science*, 103(3-4), 123-126.
- Strayer, D. L., Eviner, V. T., Jeschke, J. M. and Pace, M. L. (2006). Understanding the long-term effects of species invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(11), 645-651.
- Tedders, W. and Schaefer, P. (1994). Release and establishment of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in the southeastern United States. *Entomological News*, 105(4), 228-243.
- Vandereycken, A., Durieux, D., Joie, É., Haubruge, É. and Verheggen, F. (2012). Habitat diversity of the Multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae) in agricultural and arboreal ecosystems: a review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16(4), 553-563.
- Vilà, M., Basnou, C., Pyšek, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., . . . Roy, D. (2010). How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(3), 135-144.
- Walsh, J. R., Carpenter, S. R. and Vander Zanden, M. J. (2016). Invasive species triggers a massive loss of ecosystem services through a trophic cascade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4081-4085.
- Wang, S., Michaud, J., Tan, X., Zhang, F. and Guo, X. (2011). The aggregation behavior of *Harmonia axyridis* in its native range in Northeast China. *BioControl*, 56: 193-206.

Ware, R., Yguel, B. and Majerus, M. (2009). Effects of competition, cannibalism and intra-guild predation on larval development of the European coccinellid *Adalia bipunctata* and the invasive species *Harmonia axyridis*. *Ecological Entomology*, 34(1), 12-19.

## DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE

### II.1. RESULTATS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

Les résultats du premier chapitre n'ont pas permis de valider notre hypothèse de recherche à savoir que, « *La coccinelle indigène est plus affectée par les insecticides à risques réduits, Altacor® et Rimon®, que la coccinelle envahissante* ». Premièrement, les deux insecticides ont présenté une toxicité très différente pour les deux espèces de prédateurs et deuxièmement, l'espèce la plus affectée par un des insecticides, à savoir la coccinelle envahissante, *H. axyridis*. Ce premier chapitre, publié sous forme d'article scientifique dans le Journal of Pest Science (Cabrera *et al.*, 2017), a mis en évidence que le chlorantraniliprole et le novaluron n'ont pas la même sélectivité et que l'effet létal des deux produits sur les coccinelles dépend également de la voie d'exposition. L'Altacor s'avère plus sélectif que le Rimon sur les deux espèces de coccinelles, car aucune toxicité n'a été détectée sur les deux prédateurs, ni par voie topique ni par voie orale, sauf dans le cas de l'exposition résiduelle. Nos résultats concordent avec la tendance observée dans la littérature, car la plupart des études n'ont pas trouvé d'effets significatifs du chlorantraniliprole sur les ennemis naturels (Broughton *et al.*, 2014; Brugger *et al.*, 2010; Lau, 2014; Lefebvre *et al.*, 2012). Contrairement à l'Altacor, le Rimon a été toxique pour la coccinelle asiatique. Toutefois, les deux composés ont causé un haut taux de mortalité par voie résiduelle aux deux espèces de coccinelles. Dans les vergers, une fois que les traitements ont été faits, les résidus des deux insecticides demeurent,



en principe actifs pendant au moins 14 jours (Cormier *et al.*, 2013), ce qui représente un potentiel de risque énorme pour les larves des deux espèces de prédateurs. Cependant, il faut considérer que ces essais ont été faits dans des conditions de laboratoire et que dans ce cas on ne retrouve pas les facteurs abiotiques qui réduisent la rémanence des insecticides dans les feuilles des arbres, par exemple la lumière du soleil, la pluie et le vent (Hulbert *et al.*, 2011). Alors, des essais en conditions semi-contrôlées en verger devraient être menés afin de déterminer, dans le temps, la toxicité de ces insecticides appliqués en verger et soumis aux conditions abiotiques et biotiques retrouvées normalement dans les vergers. Le même principe pourrait s'appliquer dans le cas de l'évaluation de toxicité sur les œufs par exposition résiduelle (ponte des œufs de coccinelles sur résidus d'insecticides), lequel n'a pas été considéré dans la présente recherche.

Le premier chapitre a aussi révélé que les deux espèces de coccinelles ont une susceptibilité drastiquement différente à l'insecticide novaluron. Cette découverte est particulièrement intéressante au niveau écologique, car la coccinelle la plus affectée est un des insectes les plus envahissants dans le monde (Brown *et al.*, 2011; Snyder et Evans, 2006), tandis que la coccinelle indigène, plus tolérante à cet insecticide est aussi un prédateur généraliste important dans plusieurs cultures, notamment dans la pomme de terre et le maïs sucré (Lucas *et al.*, 2004; Lundgren, *et al.*, 2004).

Les résultats du deuxième chapitre ne supportent pas non plus notre seconde hypothèse de recherche, à savoir que, « *Les deux insecticides ont un impact négatif sur la reproduction des deux coccinelles et la coccinelle maculée indigène est plus affectée que la coccinelle asiatique envahissante* ». Ces résultats ont suivi les mêmes tendances que ceux du premier chapitre, car aucune des deux espèces de coccinelles n'a été susceptible au chlorantraniliprole, tandis que seule la coccinelle

envahissante a été affectée (drastiquement) par le novaluron. Notre étude a démontré les effets sublétaux substantiels d'un insecticide à risques réduits sur un ennemi naturel et les résultats ont fait l'objet d'un article scientifique publié dans *Journal of Pest Science* (Cabrera *et al.*, 2018). Nous avons aussi constaté la sélectivité de l'Altacor® sur les deux espèces de coccinelles et les effets toxiques majeurs du Rimon® dans la reproduction de la coccinelle asiatique. Ce deuxième chapitre met en évidence l'impact colossal de l'insecticide sur la coccinelle envahissante et l'absence d'effet sur la reproduction de la coccinelle indigène, un aspect clé pour la dynamique de leurs populations respectives, surtout en considérant que cet effet est prolongé pendant au moins 14 jours. Ceci permet de penser que la dominance de la coccinelle asiatique sur les coccinelles indigènes pourrait ne pas être maintenue dans un système où cet insecticide est appliqué, car un des facteurs qui fait de ce prédateur un envahisseur dominant est son taux reproductif élevé par rapport à la majorité d'autres coccinelles (Bazzocchi *et al.*, 2004; Michaud, 2002a). De plus, les coccinelles adultes pourraient se nourrir des proies contaminées par l'insecticide dans les zones traitées, et par la suite migrer vers une zone non traitée. Conséquemment, l'effet sublétaux se manifestera sur la fécondité et sur la fertilité aussi en dehors les cultures pendant au moins 14 jours.

Concernant le chlorantraniliprole, nous avons trouvé que cet insecticide s'est avéré peu toxique pour les deux coccinelles, sauf par voie résiduelle (chapitre 1). Cependant, dans une autre étude, réalisée récemment, des résultats différents ont été obtenus, en ce qui concerne l'effet létal. L'effet du chlorantraniliprole sur la coccinelle asiatique a été étudié par Nawaz *et al.* (2017). Ces auteurs ont trouvé une  $LC_{50}$  de 30,67 mg i.a./L pour le chlorantraniliprole appliqué sur le côté ventral des larves du deuxième stade de *H. axyridis*. Des effets sublétaux ont aussi été évalués. Le temps de développement, du deuxième et quatrième stade larvaire, ainsi que

celui des nymphes a été prolongé, alors que la longévité des adultes et la fécondité ont été réduites. Dans notre étude, avec une concentration de 50,75 mg i.a./L, soit 65 % supérieure à celle qui a causé 50% de mortalité, nos résultats ont indiqué un taux de mortalité inférieur à 30 % par voie topique et orale. De plus, nous n'avons noté aucun effet du chlorantraniliprole sur la reproduction. Ces résultats, à première vue contradictoires, pourraient être expliqués par le mode d'application de l'insecticide qui différait entre les deux études (Croft, 1990; Hardin *et al.*, 1995) et suggèrent que des études appliquées dans de conditions de terrain sont nécessaires pour évaluer les effets non intentionnels de la lutte chimique.

Concernant la prédation intraguilde entre les deux coccinelles, les hypothèses associées au dernier chapitre ont été validées, « *Le chlorantraniliprole et/ou le novaluron réduisent la valeur adaptative de l'IGP pour l'espèce de coccinelle la plus affectée au niveau léthal et sublétal par ces mêmes insecticides* » et « *La valeur adaptative de l'IGP est récupérée dans le temps suite à la neutralisation de l'insecticide par la proie intraguilde* ». Dans ce troisième chapitre, on a exploré un aspect biologique fondamental de l'impact des insecticides sur les organismes bénéfiques, c'est-à-dire sur la valeur adaptative d'une interaction écologique, soit l'IGP. Il faut souligner que l'IGP est un facteur majeur qui explique le succès d'invasion de la coccinelle asiatique (Brown *et al.*, 2011; Koch et Galvan, 2008; Pell *et al.*, 2008). Nos résultats mettent en évidence que ce facteur ne contribuerait plus à la dominance de *H. axyridis* dans les assemblages de coccinelles exposés au novaluron. Par ailleurs, cette forme de prédation serait un facteur de haut risque pour les populations de la coccinelle asiatique. Les implications de l'IGP ont été explorées sur la base de l'interaction de deux prédateurs ayant une susceptibilité différente à un même insecticide. Ainsi, le novaluron annule la valeur adaptative de l'IGP pour la coccinelle asiatique, tandis qu'il ne modifie pas la valeur adaptative de

ce comportement pour la coccinelle maculée. L'IGP, un comportement avantageux pour les prédateurs, surtout dans un contexte de faibles densités de proies extraguïdes (Polis *et al.*, 1989) devient un comportement de haut risque pour la coccinelle asiatique, avec des conséquences néfastes pour les individus. Alors que pour la coccinelle maculée, l'IGP en présence de l'insecticide conserve une haute valeur adaptative par l'élimination de compétiteur, de prédateur potentiel et l'obtention d'une ressource nutritionnelle alternative.

De plus, nous avons montré que la perte de valeur adaptative de l'IGP face à un insecticide dépend de la neutralisation du composé par la proie intraguïde. Ce processus de neutralisation commence quelque temps après l'application de la substance toxique et se poursuit dans le temps. Dans notre étude, 24 h ne suffisent pas, mais le passage au stade suivant via la mue (48 h) permet la récupération de la valeur adaptative de l'IGP. Le même phénomène peut être attendu pour un prédateur suite à l'ingestion de proies extraguïdes traitées avec le novaluron. Une proie herbivore pourrait aussi neutraliser l'insecticide à travers le temps, posant un risque plus élevé pour les prédateurs, si la prédation se produit tout de suite après les traitements, que si elle se produit plus tard dans le temps.

Alors, si on prend en considération l'effet du novaluron sur toutes les variables analysées et présentées dans les trois chapitres de cette thèse, l'impact potentiel de cet insecticide sur la coccinelle envahissante est majeur. Plusieurs des caractéristiques qui font de la coccinelle asiatique un envahisseur remarquable qui domine les espèces intraguïdes indigènes, dans diverses régions au monde (Koch, et Galvan, 2008), sont largement diminuées en présence de novaluron. L'envahisseur est fortement affecté dans sa survie, sa fécondité, sa fertilité et dans la valeur adaptative de l'IGP (Tab. II.1). Même si les expériences qui ont mené à ces résultats ont été faites dans un environnement contrôlé, les mêmes tendances ont été

retrouvées chaque fois. On peut alors spéculer que l'effet global du Rimon® sur *H. axyridis* risque d'avoir des impacts importants sur l'assemblage des coccinelles dans les cultures concernées et même dans d'autres contextes. En effet, la dominance de la coccinelle asiatique pourrait être drastiquement altérée par le novaluron, ce qui peut déterminer des changements dans la diversité et l'abondance des coccinelles. Toutefois, l'effet du novaluron sur d'autres espèces de coccinelles au Québec n'est pas connu et l'impact de l'immigration-émigration d'individus dans les cultures concernés influence l'effet des insecticides au niveau populationnel. Ceci limite la valeur des prédictions quant à l'impact du novaluron l'assemblage des ennemis naturels et sur le contrôle naturel de leurs proies.

Nos résultats confirment aussi la tolérance de la coccinelle maculée à deux insecticides à risques réduits, le chlorantraniliprole et le novaluron. Cette coccinelle a déjà démontré une grande résilience à l'invasion des écosystèmes par des espèces exotiques, car il s'agit de la coccinelle indigène la plus commune dans les cultures (Lucas *et al.*, 2007; Lundgren et Wiedenmann, 2002; Prescott et Andow, 2016; Wright et DeVries, 2000). Alors, la compatibilité des deux insecticides avec cette espèce est un critère à considérer quant à la régie phytosanitaire dans les systèmes agricoles. Des recherches au niveau écologique sur la tolérance de la coccinelle maculé à d'autres IRRs devraient être envisagées dans les années à venir. Par exemple, l'effet des insecticides dans de conditions de terrain et leur impact sur le contrôle biologique fournit par cette coccinelle.

## II.2. INFORMATION ADDITIONNELLE GÉNÉRÉE LORS DU DOCTORAT

### II.2.1. Impact du novaluron sur la nymphose chez *C. maculata* et *H. axyridis*

En plus des résultats exposés dans la présente thèse, une expérience additionnelle en laboratoire a été faite en tutorat (supervisé) dans le cadre du cours du Baccalauréat en Biologie, Initiation à la Recherche. Les manipulations en laboratoire ont été faites par l'étudiante Catherine Léger-Beaulieu en 2015 et l'étude visait à évaluer l'effet de l'insecticide Rimon® sur la nymphose de la coccinelle maculée et de la coccinelle asiatique. Des larves de quatrième stade ont été traitées avec une tour de Potter aux mêmes concentrations utilisées dans les essais de cette thèse et la mortalité a été évaluée chaque jour jusqu'au stade adulte. Les résultats ont montré que la totalité des larves de coccinelle asiatique qui ont été traitées avec le Rimon® n'ont pas survécu, tandis qu'il n'a pas eu de différences significatives quant à la mortalité des larves de coccinelle maculée traitées par rapport au témoin, car autant d'adultes ont émergé dans les deux traitements (Léger-Beaulieu *et al.*, 2015). Les individus de 4<sup>e</sup> stade larvaire ont une plus grande taille par rapport aux individus de 1<sup>er</sup> stade larvaire. Alors on pourrait s'attendre à que les larves de 4<sup>e</sup> stade soient moins susceptibles aux composés toxiques que ceux de 1<sup>er</sup> stade, car le ratio masse corporelle/surface du corps indique qu'une petite larve aura une plus grande surface du corps exposé (par rapport à sa masse corporelle) qu'une larve plus grande (Croft, 1990). Cependant, les larves de quatrième stade sont aussi susceptibles au novaluron que les larves de premier stade. Donc, la coccinelle asiatique est susceptible au novaluron pendant le développement de tous les stades larvaires. Ce qui veut dire que dans un verger traité au novaluron, les larves de la coccinelle asiatique seraient à risque pendant tout le développement larvaire.

Tableau II.1. Résumé des effets de l'Altacor et du Rimon sur la coccinelle maculée et sur la coccinelle asiatique étudiés lors du doctorat (résultats des chapitres 1, 2 et 3 et du projet Impact du novaluron sur la nymphose chez *C. maculata* et *H. axyridis*)

Variables	Voie d'exposition	Stade exposé	Chlorantraniliprole		Novaluron	
			<i>C. maculata</i>	<i>H. axyridis</i>	<i>C. maculata</i>	<i>H. axyridis</i>
Mortalité 6 jours après exposition ou avant le stade adulte (%)	Contact topique	Larves 1 <sup>er</sup> stade	5,8	6,5	8	91
		Larves 4 <sup>e</sup> stade	NT	NT	NT	90,6
	Résiduel	Larves 1 <sup>er</sup> stade	1	17,2	16,5	96
			100	99	98,8	100
Réduction fécondité (%) <sup>a</sup>	Ingestion	Adultes	11,4	9	6,7	39
Réduction fertilité (%) <sup>b</sup>			25,9	2,1	0	78,7
Stratégie de ponte			Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	Perturbée <sup>c</sup>
Temps de développement		Larves 2 <sup>e</sup> , 3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> stades	Aucun effet	Aucun effet	Aucun effet	91-100 % mortalité
Voracité			NT	NT	Aucun effet	Réduite
Gain de poids <sup>d</sup>			NT	NT	Aucun effet	100 % mortalité
Valeur adaptative IGP			NT	NT	Aucun effet	Perdu
Neutralisation <sup>d</sup> insecticide		Larves 1 <sup>er</sup> stade	NT	NT	Oui	NT

<sup>a</sup> Selon le nombre moyen d'œufs pondus par femelle pendant 15 jours (cumulatif)

<sup>b</sup> Selon le nombre moyen de larves produites par femelle pendant 15 jours (cumulatif)

<sup>c</sup> Augmentation du nombre de masses d'œufs pondues et moins d'œufs pondus par masse par rapport au témoin

<sup>d</sup> Après IGP jusqu'au stade adulte

## II.2.2. Effet létal de l'Altacor® et du Rimon® sur huit ennemis naturels présents dans les vergers québécois

### II.2.3.1. Essais de terrain (acariens prédateurs)

Des essais de terrain, réalisés pendant l'été 2011 et 2012, ont montré que deux semaines après les pulvérisations, les acariens prédateurs ont été moins nombreux

suite aux traitements insecticides (pommiers traités avec de l'Altacor® et du Rimon®) que dans les témoins (pommiers traités avec de l'eau). Par rapport à l'Altacor®, ces résultats ne concordent pas avec les résultats d'une étude de laboratoire fait précédemment, car dans ce dernier aucun effet de cet insecticide n'a été repéré chez *Neoseiulus fallacis* (Garman) (Acari: Phytoseiidae). Cependant, les mêmes auteurs ont trouvé que le Rimon® est toxique pour ce prédateur (Lefebvre *et al.*, 2012). Malheureusement, les essais de terrain ont été interrompus, car les pommiers ont dû être coupés puisqu'ils étaient infectés par *Erwinia amylovora* (Burril) (Enterobacterales, Enterobacteriaceae), agent causal de la brûlure bactérienne, ce qui nous a empêchés d'obtenir de résultats concluants dans le cas d'autres ennemis naturels retrouvés en verger.

#### II.2.3.2. Essais de laboratoire

Afin d'évaluer l'effet létal de l'Altacor® et du Rimon® sur sept autres ennemis naturels, plusieurs essais ont été faits en laboratoire. Ces essais, destinés à évaluer l'effet des insecticides par trois voies d'exposition, ont utilisé la même méthodologie décrite dans le premier chapitre de cette thèse pour les coccinelles et montrent que l'Altacor® est en général plus sélectif que le Rimon® (Tab. II.2)

D'autre part, la toxicité des deux insecticides sur le parasitoïde des œufs du carpocapse de la pomme, *Trichogramma minutum* Riley (Hym, Trichogrammatidae), a été évaluée en laboratoire et complétée avec des données de terrain dans le cadre du projet « Implantation d'un module d'efficacité des insecticides à risques réduits dans un modèle phénologique prévisionnel du carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella* (L.)) » de l'IRDA. Les résultats indiquent que le chlorantraniliprole



pourrait être compatible avec *T. minutum*, car il n'affecte pas le développement ou l'émergence du parasitoïde. Toutefois, l'absence des effets sublétaux doit être confirmée avant d'établir l'innocuité de cet insecticide. Quant au novaluron, il a eu un effet négatif sur l'émergence du parasitoïde. Cependant, le développement des individus de l'œuf à la nymphe et de la nymphe à l'adulte n'a pas été affecté.

### II.3. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les résultats sur l'effet des insecticides sur les ennemis naturels ont fait l'objet de conférences destinées aux conseillers pomicoles privés et publics lors des 21<sup>es</sup> et 22<sup>es</sup> Journées annuelles sur la recherche et l'innovation technologique (JARIT) du Réseau de recherche et d'expertise pomicole en PFI en 2013 («*Effet du Rimon® et Altacor® sur les ennemis naturels des ravageurs du pommier*») et 2014 («*Effet léthal et sublétal de l'Altacor® et du Rimon® sur les prédateurs de pucerons en vergers de pommiers*»), respectivement. De plus, cette information a été incluse dans Sage Pesticides, un site web qui a pour objectif de permettre aux producteurs et aux conseillers agricoles de faire un choix éclairé quant aux produits de protection des cultures homologués (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017c). L'affiche «*Lethal effects of two reduced risk insecticides on aphidophagous predators in apple orchards*» a été présentée lors de la Global Conference on Entomology, à Kuching, en Malaisie en 2013.

Tableau II.2. Toxicité du chlorantranilprole (Altacor® 35 WG; 145 g/ha) et du novaluron (Rimon®10 EC; 1 L/ha) sur des œufs 72 h après l'exposition et sur des larves 6 jours après l'exposition, sur six ennemis naturels aphidiphages présents dans les vergers de pommiers au Québec. Les concentrations des insecticides ont été calculées à partir d'un volume de pulvérisation de 1000 L/ha.

Espèces	Voies d'exposition					
	Contact topique		Ingestion		Résiduel	
	Altacor	Rimon	Altacor	Rimon	Altacor	Rimon
Punaise de la molène <i>Campylomma verbasci</i> (Hem, Miridae)	Larves 4 <sup>e</sup> stade (1)	Larves 4 <sup>e</sup> stade (3)	NT	NT	NT	NT
Syrphe <i>Euopedes americanus</i> (Wiedemann) (Dip, Syrphidae)	Oeufs (1)	Oeufs (1)	NT	NT	Larves 1 <sup>er</sup> stade (2)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (3)
	Larves 1 <sup>er</sup> stade (2)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (3)				
Cécidomyie du puceron <i>Aphidoletes aphidimyza</i> (Dip, Cecidomyiidae)	Oeufs (1)	Oeufs (1)	NT	NT	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)
	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (2)				
Chamémyie Leucopis <i>Leucopis gliphinivora</i> (Dip, Chamaemyiidae)	Oeufs (1)	Oeufs (1)	NT	NT	NT	NT
	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)				
Chrysope <i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens) (Neur, Chrysopidae)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (2)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (3)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (3)	NT	NT
Coccinelle à deux-points** <i>Adalia bipunctata</i> (Col, Coccinellidae)	Oeufs (1)	Larves 1 <sup>er</sup> stade (3)	---	---	---	---
	Larves 1 <sup>er</sup> stade (1)					

Classification de toxicité de l'OILB selon la réduction de mortalité trouvée en laboratoire : Peu ou pas toxique 1 = < 30%; modérément toxique 2 = 30% – 79%; Toxique 3 = 80% – 99%; Très Toxique 4 = >99%. (Boller *et al.*, 2006).

\*\*Des concentrations plus faibles de chaque insecticide ont été utilisées pour ce prédateur, soit 0,02 g i.a./L chlorantranilprole et 0,04 g i.a./L novaluron.

Les résultats obtenus tout au long du doctorat ont fait aussi l'objet des présentations orales lors du congrès annuel de la Société d'Entomologie du Québec

en 2013 (« *Sensibilité différentielle de deux espèces de Coccinellidae face à deux insecticides à risques réduits* »), 2014 (« *Toxicité de deux insecticides à risques réduits sur la guildes aphidiphage en vergers de pommiers* ») et 2016 (« *Impact d'un insecticide à risques réduits sur la valeur adaptative de la prédation intragilde chez deux coccinelles prédatrices* »).

En 2014, les premiers résultats correspondant au premier chapitre ont été exposés à la réunion du Groupe de Travail « Pesticides et Organismes Utiles » de l'Organisation internationale de lutte biologique (OILB-SROP), en Belgique, sous le titre « *Lethal effects of two reduced risk insecticides on Harmonia axyridis and Coleomegilla maculata (Col., Coccinellidae) following two routes of exposure* ». De cette présentation orale, un article scientifique a été publié dans le Bulletin de l'OILB-SROP la même année (Cabrera *et al.*, 2014).

La collaboration entre l'IRDA et l'UQAM a aussi permis de produire l'affiche, « *Sensibilité du parasitoïde Trichogramma minutum à deux insecticides à risques réduits utilisés contre le carpocapse de la pomme* », présenté lors de la rencontre du Groupe de travail sur la PFI de l'OILB et du Congrès conjoint de la Société d'Entomologie du Québec (SEQ) et de la Société de protection des plantes du Québec (SPPQ) en 2016. Un article scientifique a été aussi publié à partir de cette étude (Cormier *et al.*, 2017).

#### II.4. IMPLICATIONS DE L'INFORMATION GÉNÉRÉE PAR LE DOCTORAT ET SUITE DES ÉTUDES

Au niveau fondamental, ce doctorat a permis de connaître les effets de deux insecticides censés d'être à risques réduits sur deux coccinelles généralistes dans

plusieurs systèmes agricoles, ainsi que sur d'autres prédateurs de la guildes des aphidiphages (Tab. II.2) et un parasitoïde de lépidoptères (Cormier *et al.*, 2017). L'information générée par cette étude indique que les ennemis naturels peuvent avoir des susceptibilités très différentes à un même composé. Au niveau appliqué, cette étude a plusieurs implications. Premièrement, dans le cadre de la lutte intégrée, l'insecticide Altacor est une meilleure alternative au Rimon, car le premier est plus sélectif envers les ravageurs. Dans le cas des cultures agricoles où un ou les deux insecticides sont utilisés, il serait recommandable d'éviter des traitements quand la plupart des états immatures des ennemis naturels sont présents, en considérant que l'activité résiduelle des deux produits est de deux semaines.

Deuxièmement, cette étude a permis de mettre en évidence que les insecticides à risques réduits pourraient perturber les services écosystémiques de guildes d'ennemis naturels, notamment en termes de lutte biologique.

Dans les dernières années, un nombre important de recherches se sont concentrées sur l'effet des insecticides sur les arthropodes bénéfiques, notamment sur l'effet des insecticides néonicotinoïdes sur les pollinisateurs (Decourtye et Devillers, 2010; Krupke *et al.*, 2012 ; Rundlöf *et al.*, 2015). Par exemple, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a identifié en 2013 plusieurs risques associés à trois des insecticides néonicotinoïdes pour les abeilles, soient la clothianidine, l'imidaclopride et le thiaméthoxame. Les risques, aigus et chroniques, touchent la survie et le développement des colonies d'abeilles, les larves et le comportement des abeilles, ainsi que d'autres risques, reliés à des doses sublétales de ces trois composés. De plus, cette évaluation a fait comprendre le besoin d'un niveau de contrôle plus élevé lors de l'interprétation des études, ainsi que des études encore plus exhaustives sur les effets de ces insecticides (EFSA, 2013). Une mise à jour de cette évaluation a été faite en 2018 et il a été confirmé que ces néonicotinoïdes posent un risque

important pour les abeilles domestiques, les bourdons et les abeilles solitaires (EFSA, 2008).

Ces constats ont occasionné la prohibition de ces composés pendant deux ans par la Commission européenne en 2013 (EFSA, 2013) et la France a interdit l'utilisation de produits phytopharmaceutiques contenant des substances actives de la famille des néonicotinoïdes, pour tout type d'utilisation, à compter du 1<sup>er</sup> septembre 2018 (Legifrance, 2016). Ceci indique que les effets non intentionnels des insecticides peuvent avoir des impacts importants au niveau écologique et économique. Bien que le rôle écologique et économique des pollinisateurs soit incontestable (Gallai *et al.*, 2009), les ennemis naturels des phytophages, essentiels dans les chaînes trophiques, méritent également une attention particulière quant aux effets des pesticides utilisés en agriculture sur leurs populations. Toutefois, comme il a déjà été mentionné dans l'introduction de cette thèse, l'abeille est le seul insecte bénéfique pour lequel l'homologation canadienne exige de l'information standardisée sur les effets des pesticides (Santé Canada, 2002). Concernant les ennemis naturels, les exigences ne sont pas claires. Il faut présenter de l'information dans certains cas, seulement si cette information est disponible (Santé Canada, 2009a) ou s'il existe un risque d'exposition aux produits. D'autre part, dans le calcul de l'indice des risques pour l'environnement (IRE) utilisé au Québec, l'abeille est également le seul insecte bénéfique pris en considération (Samuel *et al.*, 2012). Ainsi, l'IRE de l'Altacor est de 91, tandis que celui du Rimon est de 49 (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017b), même si ce dernier insecticide s'avère moins sélectif pour les ennemis naturels que le premier. Bien qu'en PFI on considère l'effet des produits phytosanitaires sur les ennemis naturels (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2017c), l'information sur ces effets, qui n'est pas normalisée, provenant des études

diverses et des observations faites dans les vergers n'est pas prise en compte pour le calcul de l'IRE. Par contraste, pour homologuer un pesticide dans les pays membres de l'Union européenne, la directive 91/414/CEE exige des études sur l'effet létal et les effets sublétaux sur des espèces indicatrices d'ennemis naturels, choisis en fonction de leur grande susceptibilité aux pesticides. Si des études de laboratoire indiquent que le pesticide est toxique pour ces espèces, des études de laboratoire étendues ou dans le terrain sont demandées. Dans ces derniers cas, il faut inclure une espèce d'ennemi naturel de plus, à choisir entre 4 espèces prédéfinies qui appartient aux familles Coccinellidae, Staphylinidae, Chrysopidae ou Anthocoridae (Medina *et al.*, 2008).

Alors, l'exemple de l'Europe peut servir de base pour développer une démarche spécifique aux ennemis naturels dans le cadre de l'homologation des insecticides au Canada. Des ennemis naturels clés dans les cultures pourraient être sélectionnés comme espèces de référence. Par exemple, on peut penser aux acariens prédateurs phytoseiides, lesquels ont démontré être sensibles à plusieurs pesticides et qui sont essentiels pour prévenir l'apparition des ravageurs secondaires (Argolo *et al.*, 2014; Pozzebon et Duso, 2010). À titre indicatif, le phytoseiide *Euseius victoriensis* (Womersley) est l'acarien prédateur le plus sensible aux pesticides dans les vignes australiennes et il a déjà été utilisé comme espèce indicatrice, représentant l'ensemble des acariens phytoseiides dans les vignes pour prédire la toxicité de plusieurs pesticides sur ces prédateurs (Bernard *et al.*, 2010).

Un autre aspect appliqué qui ressort de ce doctorat fait référence aux méthodologies d'évaluation des effets des insecticides. Il est essentiel de considérer le mode d'action des insecticides quand leur effet létal est évalué dans le temps. Ainsi un insecticide neurotoxique aura un effet assez rapide sur la mortalité des individus. Par contre, un insecticide régulateur de la croissance des insectes prendra

plus de temps à agir. Par exemple, dans cette étude (chapitre 2), le novaluron a pris 6 jours pour manifester un effet létal et d'être classifié comme toxique<sup>13</sup>, pour les larves de *C. verbasci*, d'*E. americanus* et de *C. carnea*. Si l'évaluation de la mortalité avait été faite jusqu'à 3 jours, on aurait classifié cet insecticide comme inoffensif ou modérément toxique pour ces insectes, car la plupart des individus n'étaient pas encore morts suivant 3 jours après l'exposition.

En outre, en plus d'évaluer l'effet létal des insecticides, il est primordial d'évaluer les effets sublétaux, sur la reproduction et sur les comportements des ennemis naturels, lesquels peuvent avoir de répercussions énormes pour les populations. On souligne que la sélectivité des insecticides sur les ennemis naturels est un critère essentiel en lutte intégrée et que les effets des pesticides se manifestent au niveau des individus, sur les populations et sur les communautés. Des recherches sur l'effet des insecticides sur la diversité fonctionnelle des ennemis naturels pour la lutte biologique sont aussi impératives, de même que des études sur les effets des synergies des pesticides utilisés dans les cultures sur les ennemis naturels. Ces impacts doivent être examinés pour mieux prédire les conséquences des pesticides dans l'environnement et améliorer l'homologation de ces produits. Dans ce contexte, la toxicologie démographique est une méthode écologiquement appropriée pour calculer l'effet total des pesticides sur les agents de lutte biologique (Talebi *et al.*, 2008). Des études au niveau du paysage sont aussi nécessaires, car la composition et la qualité des habitats influencent la lutte biologique, et aussi la mitigation des effets non désirés des pesticides sur les ennemis naturels. Actuellement, il existe des méthodologies permettant d'approfondir les connaissances sur l'importance relative des effets locaux et du paysage des

---

<sup>13</sup> Selon la classification de résultats des essais de laboratoire de l'OILB (Boller, 2006).

pesticides sur les ennemis naturels et sur les services qu'ils offrent (Roubos *et al.*, 2014).

La présente thèse met en évidence la pertinence d'évaluer les effets des pesticides sur les espèces envahissantes, un facteur à considérer particulièrement dans le cadre de l'évaluation des risques des agents de lutte biologique exotiques. Enfin, d'un point de vue théorique, ce doctorat a permis de mieux comprendre l'impact des pesticides sur la prédation intragilde, un comportement répandu dans la nature et important pour la conservation des espèces, ainsi que pour la lutte biologique, spécialement dans le cadre des régions phytosanitaires en agriculture.

Globalement, cette thèse contribue à l'élaboration de réglementations futures sur l'utilisation et l'homologation des insecticides et de leur risque pour l'environnement. Particulièrement, les résultats observés lors de ce doctorat contribuent à comprendre les effets des insecticides sur les organismes bénéfiques, c'est pourquoi les futures recherches devraient viser des alternatives aux pesticides dans une optique de développement durable.



## BIBLIOGRAPHIE

- Adama. (2015). *RIMON 10 EC Insecticide. Canadian Label*. Winnipeg, MB : Adama Agricultural Solutions Canada.
- Adriaens, T., Gomez, G. S. M. et Maes, D. (2008). Invasion history, habitat preferences and phenology of the invasive ladybird *Harmonia axyridis* in Belgium. *BioControl*, 53(1), 69-88.
- Agnello, A., Chouinard, G., Firlej, A., Turechek, W., Vanoosthuyse, F. et Vincent, C. (2000). *Tree Fruit Field Guide to Insect, Mite and Disease Pests and Natural Enemies of Eastern North America*. Ithaca, New York : Natural Ressource, Agriculture, and Engineering Service.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2015). Profil de la culture de la pomme au Canada, 2013 [94]. Récupéré de <http://www.agr.gc.ca/fra/?id=1299250331153>
- Allen, M. L. (2015). Greenhouse evaluation of neonate and adult applications of *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to control two spotted spider mite infestations. *Florida Entomologist*, 98(2), 714-720.
- Allgeier, S., Frombold, B., Mingo, V. et Brühl, C. A. (2018). European common frog *Rana temporaria* (Anura: Ranidae) larvae show subcellular responses under field-relevant *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* (Bti) exposure levels. *Environmental Research*, 162, 271–279.
- Alyokhin, A. (2009). Colorado potato beetle management on potatoes: current challenges and future prospects. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*, 3(1), 10-19.
- Anatis Bioprotection. (2017). Coccinelle convergente. Dans *Produits*. Récupéré de <http://anatisbioprotection.com/produits-lutte-biologique/coccinelle-convergente-hippodamia-convergens.html>

- Amarasekare, K. G., Shearer, P. W. et Mills, N. J. (2016). Testing the selectivity of pesticide effects on natural enemies in laboratory bioassays. *Biological Control*, 102, 7-16.
- Argolo, P. S., Jacas, J. A. et Urbaneja, A. (2014). Comparative toxicity of pesticides in three phytoseiid mites with different life-style occurring in citrus: *Euseius stipulatus*, *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis*. *Experimental and Applied Acarology*, 62(1), 33-46.
- Barbosa, W. F., Smagghe, G. et Guedes, R. N. C. (2015). Pesticides and reduced-risk insecticides, native bees and pantropical stingless bees: pitfalls and perspectives. *Pest Management Science*, 71(8), 1049-1053.
- Barnes, M. M. (1991). Tortricids in pome and stone fruits, codling moth occurrence, host race formation, and damage. Dans W. Helle (dir.), *Tortricid Pests: Their Biology, Natural Enemies and Control* (p. 313-328). Amsterdam, The Netherlands : Elsevier.
- Bassi, A., Rison, J. L. et Wiles, J. A. (2009). Chlorantraniliprole (DPX-E2Y45, RYNAXYPYR®, CORAGEN®), a new diamide insecticide for control of codling moth (*Cydia pomonella*), colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*) and European grapevine moth (*Lobesia botrana*). *Nova Gorica*, 4(5), 39-45.
- Bastos, C. S., de Almeida, R. P. et Suinaga, F. A. (2006). Selectivity of pesticides used on cotton (*Gossypium hirsutum*) to *Trichogramma pretiosum* reared on two laboratory-reared hosts. *Pest Management Science*, 62(1), 91-98.
- Bazzocchi, G. G., Lanzoni, A., Accinelli, G. et Burgio, G. (2004). Overwintering, phenology and fecundity of *Harmonia axyridis* in comparison with native coccinellid species in Italy. *BioControl*, 49(3), 245-260.
- Beers, E. H., Horton, D. R. et Miliczky, E. (2016a). Pesticides used against *Cydia pomonella* disrupt biological control of secondary pests of apple. *Biological Control*, 102, 35-43.
- Beers, E. H., Mills, N. J., Shearer, P. W., Horton, D. R., Miliczky, E. R., Amarasekare, K. G. et Gontijo, L. M. (2016b). Nontarget effects of orchard pesticides on natural enemies: Lessons from the field and laboratory. *Biological Control*, 102, 44-52.

- Berkvens, N., Bonte, J., Berkvens, D., Deforce, K., Tirry, L. et De Clercq, P. (2008). Pollen as an alternative food for *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53(1), 201-210.
- Bernard, M. B., Cole, P. G., Kobelt, A., Horne, P. A., Altmann, J., Wratten, S. D. et Yen, A. L. (2010). Reducing the Impact of Pesticides on Biological Control in Australian Vineyards: Pesticide Mortality and Fecundity Effects on an Indicator Species, the Predatory Mite *Euseius victoriensis* (Acari: Phytoseiidae). 103(6), 2061-2071.
- Binnington, K. et Retnakaran, A. (1991). Epidermis, a biologically active target for metabolic inhibitors. Dans *Physiology of the Insect Epidermis* (p. 307-326). Melbourne : CSIRO.
- Biobest. (2017). Adalia-System. Dans *Auxiliaires*. Récupéré de <http://www.biobestgroup.com/fr/biobest/produits/lutte-biologique-contre-les-ravageurs-4459/auxiliaires-4478/adalia-system-4718/>
- Boller, E. F., Vogt, H., Ternes, P. et Malavolta, C. (2006). *Working Document on Selectivity of Pesticides*.
- Boulé, J., Chouinard, G., Morin, Y. et Vincent, C. (1997). Biologie et dépistage des principaux insectes et acariens du pommier. Dans *Manuel de l'observateur pommiers* (p. 21-24).
- Bousquet, Y., Bouchard, P., Davies, A.E., et Sikes, D.S. (2013). Checklist of beetles (Coleoptera) of Canada and Alaska. ZooKeys: 1.
- Broughton, S., Harrison, J. et Rahman, T. (2014). Effect of new and old pesticides on *Orius armatus* (Gross) - an Australian predator of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Pest Management Science*, 70(3), 389-397.
- Brown, M. (2004). Role of aphid predator guild in controlling spirea aphid populations on apple in West Virginia, USA. *Biological Control*, 29(2), 189-198.

- Brown, M. W., Schmitt, J. J., Ranger, S. et Hogmire, H. W. (1995). Yield reduction in apple by edaphic woolly apple aphid (Homoptera: Aphididae) populations. *Journal of Economic Entomology*, 88(1), 127-133.
- Brown, P. M., Thomas, C. E., Lombaert, E., Jeffries, D. L., Estoup, A. et Handley, L.-J. L. (2011). The global spread of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae): distribution, dispersal and routes of invasion. *Biocontrol*, 56(4), 623-641.
- Brown, P. M. J., Adriaens, T., Bathon, H., Cuppen, J., Goldarazena, A., Hägg, T., . . . Loomans, A. J. M. (2008). *Harmonia axyridis* in Europe: spread and distribution of a non-native coccinellid. *BioControl*, 53(1), 5-21.
- Brown, P. M. J., Ingels, B., Wheatley, A., Rhule, E. L., De Clercq, P., Van Leeuwen, T. et Thomas, A. (2015). Intraguild predation by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) on native insects in Europe: molecular detection from field samples. *Entomological Science*, 18(1), 130-133.
- Brugger, K. E., Cole, P. G., Newman, I. C., Parker, N., Scholz, B., Suvagia, P., . . . Hammond, T. G. (2010). Selectivity of chlorantraniliprole to parasitoid wasps. *Pest Management Science*, 66(10), 1075-1081.
- Cabrera, P., Cormier, D., Fournier, M. et Lucas, É. (2014). Lethal effects of two reduced risk insecticides on *Harmonia axyridis* and *Coleomegilla maculata* (Col., Coccinellidae) following two routes of exposure. *IOBC-WPRS Bulletin*, 103, 41-45.
- Cabrera, P., Cormier, D. et Lucas, É. (2017). Differential Sensitivity of an Invasive and an Indigenous Ladybeetle to Two Reduced-Risk Insecticides. *Journal of Applied Entomology*, 141(9), 690–701.
- Cabrera, P., Cormier, D. et Lucas, É. (2018). Sublethal Effects of Two Reduced-risk Insecticides: When the invasive ladybeetle is drastically affected whereas the indigenous not. *Journal of Pest Science*, 91, 1153–1164.
- Carvalho, G. A., Godoy, M. S., Parreira, D. S. et Rezende, D. T. (2010). Effect of chemical insecticides used in tomato crops on immature *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Revista Colombiana De Entomologia*, 36(1), 10-15.

- Cho, J. R., Hong, K. J., Yoo, J. K., Bang, J. R. et Lee, J. O. (1997). Comparative toxicity of selected insecticides to *Aphis citricola*, *Myzus malisuctus* (Homoptera: Aphididae), and the predator *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Economic Entomology*, 90(1), 11-14.
- Chouinard, G. (1997). *Manuel de l'observateur: Pommier*.
- Chouinard, G. (2016). Répertoire des principaux organismes utiles en vergers. *Fiche 11*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré le 2-12-2017 de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Chouinard, G. (2017). Introduction à la production fruitière intégrée. *Fiche 6*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Chouinard, G. et Bellerose, S. (2017). Classification des pesticides utilisables en PFI en fonction de leur impact sur l'environnement, la santé et la faune auxiliaire. *Fiche synthèse, IRDA. 2 p.*
- Chouinard, G., Firlej, A., Vanoosthuysse, F. et Vincent, C. (2000). *Guide d'identification des ravageurs du pommier et de leurs ennemis naturels*. Québec : Institute de Recherche et de Développement en Agroenvironnement.
- Chouinard, G. et Morin, Y. (2017). Grilles de dépistage pour les vergers. Calendrier d'apparition des principaux ravageurs et organismes utiles. *Fiche 65*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Chouinard, G., Morin, Y., Maheux, R., Bellerose, S. et Lachapelle, M. (2017). Insecticides homologués en pomiculture au Québec. *Fiche 46*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Chouinard, G. et Phillion, V. (2017). *Production fruitière intégrée 2017*. Affiche grand format. IRDA (Comité PFI du Réseau-pommier).
- Chouinard, G., Phillion, V. et Bellerose, S. (2016). Répertoire des principaux organismes nuisibles des vergers. *Fiche 10*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>

- Chouniard, G., Morin, Y., Cormier, D. et Maheux, R. (2017). Description et efficacité des prédateurs de pucerons. Fiche 97. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Cloyd, R. (2005). Compatibility conflict: is the use of biological control agents with pesticides a viable management strategy?, *Second International Symposium on Biological Control of Arthropods, Septembre 12-16, 2005* (p. 546-554). Davos, Switzerland.
- Cloyd, R. (2012). Indirect Effects of Pesticides on Natural Enemies. Dans *Pesticides-Advances in Chemical and Botanical Pesticides* (chap. 6, p. 127-150). Rijeka. Croatia : Intech.
- Coderre, D., Lucas, É. et Gagné, I. (1995). The occurrence of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) in Canada. *The Canadian Entomologist*, 127(4), 609-611.
- Cohen, E. (1993). Chitin synthesis and degradation as targets for pesticide action. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 22(1-2), 245-261.
- Cordova, D., Benner, E. A., Sacher, M. D., Rauh, J. J., Sopa, J. S., Lahm, G. P., . . . Tao, Y. (2006). Anthranilic diamides: A new class of insecticides with a novel mode of action, ryanodine receptor activation. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 84(3), 196-214.
- Cormier, D., Cabrera, P., Vanoosthuysse, F., Fournier, M. et Lucas, É. (2017). Effects of two reduced-risk insecticides on the egg parasitoid *Trichogramma minutum* in apple orchards. *IOBC-WPRS Bulletin*, 123, 110-114.
- Cormier, D., Pelletier, F. et Chouinard, G. (2013). Residual toxicity of six reduced-risk insecticides to codling moth eggs and neonate larvae. *IOBC-WPRS Bulletin*, 91, 147-151.
- Cottrell, T. E. et Yeargan, K. V. (1998). Intraguild predation between an introduced lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), and a native lady beetle, *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 159-163.

- Coutanceau, J. P. (2006). *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773): une coccinelle asiatique introduite, acclimatée et en extension en France. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 111(3), 395-401.
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. New York : John Wiley and Sons.
- Crowder, D. W. et Snyder, W. E. (2010). Eating their way to the top? Mechanisms underlying the success of invasive insect generalist predators. *Biological Invasions*, 12(9), 2857-2876.
- Cutler, G. C. et Scott-Dupree, C. D. (2007). Novaluron: Prospects and Limitations in Insect Pest Management. *Pest Technology*, 1(1), 38-46.
- Cutler, G. C., Scott-Dupree, C. D., Tolman, J. H. et Harris, C. R. (2006). Toxicity of the insect growth regulator novaluron to the non-target predatory bug *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Biological Control*, 38(2), 196-204.
- Davis, M. A. et Thompson, K. (2000). Eight ways to be a colonizer; two ways to be an invader: a proposed nomenclature scheme for invasion ecology. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 81(3), 226-230.
- Decourtye, A. et Devillers, J. (2010). Ecotoxicity of neonicotinoid insecticides to bees. Dans *Insect nicotinic acetylcholine receptors* (p. 85-95). New York : Springer.
- Deguine, J. P. (2008). *Protection des cultures : de l'agrochimie à l'agroécologie*. Versailles : Éditions Quae.
- Desneux, N., Decourtye, A. et Delpuech, J. M. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52, 81-106.
- Dinter, A. B., Brugger, K. E., Frost, N. M. et Woodward, M. D. (2009). Chlorantraniliprole (Rynaxypyr): A novel DuPont™ insecticide with low toxicity and low risk for honey bees (*Apis mellifera*) and bumble bees (*Bombus terrestris*) providing excellent tools for uses in integrated pest management. *Julius-Kühn-Archiv*, 423(84).

- Dowd, P. F., Smith, M. C. et Sparks, T. C. (1983). Detoxification of plant toxins by insects. *Insect Biochemistry*, 13(5), 453-468.
- DuPont. (2016). *Insecticide CORAGEN<sup>mc</sup>. Canadian Label*.
- DuPont. (2013). *ALTACOR<sup>®</sup> Insecticide. Canadian label*.
- DuPont. (2017). *DUPONT<sup>™</sup> Lumivia<sup>™</sup> Seed Treatment. Canadian Label*.
- Dutcher, J. D. (2007). A review of resurgence and replacement causing pest outbreaks in IPM. Dans A. Ciancio et K.G. Mukerji (dir.), *General concepts in integrated pest and disease Management* (p. 27-43). Netherlands : Springer.
- EFSA. (2013). L'EFSA identifie les risques associés aux néonicotinoïdes pour les abeilles. Dans *Actualités*. Récupéré de <http://www.efsa.europa.eu/fr/press/news/130116>
- EFSA. (2018). Neonicotinoids: Risk to bees confirmed. Dans *News*. <https://www.efsa.europa.eu/en/press/news/180228>.
- Ehler, L. (2006). Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, 62(9), 787-789.
- Elliott, N., Kieckhefer, R. et Kauffman, W. (1996). Effects of an invading coccinellid on native coccinellids in an agricultural landscape. *Oecologia*, 105(4), 537-544.
- EPA. (1998). *US EPA Reduced-Risk Pesticides. General Overview: Reduced-risk pesticide program*. Récupéré de <http://www.fluoridealert.org/wp-content/pesticides/categories.epa.reduced.risk.htm>
- EPA. (2004). *Chemicals evaluated for carcinogenic potential*. Récupéré de [https://a816-healthpsi.nyc.gov/LL37/pdf/carcclassJuly2004\\_1.pdf](https://a816-healthpsi.nyc.gov/LL37/pdf/carcclassJuly2004_1.pdf)
- EPA. (2008). *Pesticide Fact Sheet. Chlorantraniliprole*. Récupéré de [https://www3.epa.gov/pesticides/chem\\_search/reg\\_actions/registration/fs\\_PC-090100\\_01-Apr-08.pdf](https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-090100_01-Apr-08.pdf)



- EPA. (2009). *Labeling Amendment. Dupont Altacor*. Récupéré de [https://www3.epa.gov/pesticides/chem\\_search/ppls/000352-00730-20090616.pdf](https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/000352-00730-20090616.pdf).
- EPA. (2016). *Pesticide Registration. Conventional Reduced Risk Pesticide Program*. Récupéré de [https://19january2017snapshot.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program_.html)
- EPA. (2017a). *Reduced Risk and Organophosphate Alternative Decisions for Conventional Pesticides*. Récupéré de [https://19january2017snapshot.epa.gov/pesticide-registration/reduced-risk-and-organophosphate-alternative-decisions-conventional\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/pesticide-registration/reduced-risk-and-organophosphate-alternative-decisions-conventional_.html)
- EPA. (2017b). *Pesticide Registration. PRN 97-3: Guidelines for Expedited Review of Conventional Pesticides under the Reduced-Risk Initiative and for Biological Pesticides*. Récupéré de <https://www.epa.gov/pesticide-registration/prn-97-3-guidelines-expedited-review-conventional-pesticides-under-reduced#characteristics>
- Epstein, L. (2014). Fifty years since silent spring. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 377-402.
- Étilé, E. (2013). *Pratiques agricoles favorisant la répression des ravageurs des cultures par leurs prédateurs naturels*. (A59-13/2014F-PDF)(0660218518). [Revue de littérature]. Montréal, Québec : Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Eubanks, M. D., Blackwell, S. A., Parrish, C. J., Delamar, Z. D. et Hull-Sanders, H. (2002). Intraguild predation of beneficial arthropods by red imported fire ants in cotton. *Environmental Entomology*, 31(6), 1168-1174.
- Evans, E. W., Soares, A. O. et Yasuda, H. (2011). Invasions by ladybugs, ladybirds, and other predatory beetles. *BioControl*, 56(4), 597-611.
- Facon, B., Hufbauer, Ruth A., Tayeh, A., Loiseau, A., Lombaert, E., Vitalis, R., . . . Estoup, A. (2011). Inbreeding depression is purged in the invasive insect *Harmonia axyridis*. *Current Biology*, 21(5), 424-427.

- FAO. (2003). *FAO Specifications and Evaluations for Plant Protection Products. NOVALURON. (Evaluation Report 672/2003)*. Récupéré de [http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests\\_Pesticides/Specs/novaluro.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/Specs/novaluro.pdf)
- FAO et WHO. (2008). *Specifications for pesticides. A training manual Trial Edition 1*. Récupéré de [http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests\\_Pesticides/eng\\_Participant\\_guide\\_pesticide\\_specification.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/eng_Participant_guide_pesticide_specification.pdf)
- Fernandes, M. E., Alves, F. M., Pereira, R. C., Aquino, L. A., Fernandes, F. L. et Zanuncio, J. C. (2016). Lethal and sublethal effects of seven insecticides on three beneficial insects in laboratory assays and field trials. *Chemosphere*, 156, 45-55.
- Fernandez, L. (2015). *Lethal and Sublethal Effects of Pesticides Used in Western United States Orchards on Hippodamia convergens*. (Ph.D.). University of California, Berkeley, Ann Arbor. Récupéré de *ProQuest Dissertations & Theses Global*.
- Finke, D. L. et Denno, R. F. (2002). Intraguild predation diminished in complex-structured vegetation: implications for prey suppression. *Ecology*, 83(3), 643-652.
- Fréchette, B., Cormier, D., Chouinard, G., Vanoosthuyse, F. et Lucas, E. (2008). Apple aphid, *Aphis spp.* (Hemiptera: Aphididae), and predator populations in an apple orchard at the non-bearing stage: The impact of ground cover and cultivar. *European Journal of Entomology*, 105, 521-529.
- Fréchette, B., Larouche, F. et Lucas, E. (2008). *Leucopis annulipes* larvae (Diptera : Chamaemyiidae) use a furtive predation strategy within aphid colonies. *European Journal of Entomology*, 105(3), 399-403.
- Front Research. (2017). DuPont Expands the Market of Chlorantraniliprole. Récupéré le 3-05-2017 de <http://www.frontresearch.com/news/dupont-expands-the-market-of-chlorantraniliprole/>
- Gagnon, A. È., Heimpel, G. E. et Brodeur, J. (2011). The ubiquity of intraguild predation among predatory arthropods. *PLoS One*, 6(11), e28061.

- Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J. et Vaissière, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics*, 68(3), 810-821.
- Galvan, T. L., Koch, R. L. et Hutchison, W. D. (2006). Toxicity of indoxacarb and spinosad to the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), via three routes of exposure. *Pest Management Science*, 62(9), 797-804.
- Gardiner, M., Landis, D., Gratton, C., Schmidt, N., O'Neal, M., Mueller, E., . . . DiFonzo, C. (2009). Landscape composition influences patterns of native and exotic lady beetle abundance. *Diversity and Distributions*, 15(4), 554-564.
- Gonsalves, L., Law, B., Webb, C. et Monamy, V. (2013). Foraging ranges of insectivorous bats shift relative to changes in mosquito abundance. *PLoS One* 8, e64081
- Gontijo, P. C., Moscardini, V. F., Michaud, J. P. et Carvalho, G. A. (2014). Non-target effects of chlorantraniliprole and thiamethoxam on *Chrysoperla carnea* when employed as sunflower seed treatments. *Journal of Pest Science*. 87: 711-719.
- Gordon, R. D. (1985). The Coccinellidae (Coleoptera) of America north of Mexico. *Journal of the New York Entomological Society*, 93(1).
- Gradish, A. E., Scott-Dupree, C. D., Shipp, L., Harris, C. R. et Ferguson, G. (2011). Effect of reduced risk pesticides on greenhouse vegetable arthropod biological control agents. *Pest Management Science*, 67(1), 82-86.
- Grafius, E. (2007). Insecticide Resistance Management. Dans *Encyclopedia of Pest Management, Volume II* (p. 271-274). CRC Press.
- Granados, G. (2002). Gestion intégrée des ravageurs. Dans R. L. Paliwal, G. Granados, H. R. Lafitte et A. D. Violic (dir.), *Le maïs en zones tropicales. Amélioration et production* (vol. 28, p. 301-320). Rome : FAO.
- Grez, A., Zaviezo, T., González, G. et Rothmann, S. (2010). *Harmonia axyridis* in Chile: a new threat. *Ciencia e Investigación Agraria*, 37(3), 145-149.

- Grosscurt, A. C. (1978). Diflubenzuron: Some aspects of its ovicidal and larvicidal mode of action and an evaluation of its practical possibilities. *Pesticide Science*, 9(5), 373-386.
- Hagen, M. (1973). A history of biological control. Dans R. F. E. Smith, C. N. E. Smith et T. E. E. Mittler (dir.), *History of entomology* (p. 433-476). Palo Alto, California : Annual Review of Entomology.
- Hardin, M. R., Benrey, B., Coll, M., Lamp, W. O., Roderick, G. K. et Barbosa, P. (1995). Arthropod pest resurgence: an overview of potential mechanisms. *Crop Protection*, 14(1), 3-18.
- Hardman, J. M., Franklin, J. L., Jensen, K. I. et Moreau, D. L. (2006). Effects of pesticides on mite predators (Acari: Phytoseiidae) and colonization of apple trees by *Tetranychus urticae*. *Phytoparasitica*, 34(5), 449-462.
- Harmon, J. P., Stephens, E. et Losey, J. (2006). The decline of native coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae) in the United States and Canada. Dans *Beetle Conservation* (p. 85-94). Netherlands : Springer.
- Hautier, L., Grégoire, J. C., de Schauwers, J., San Martin, G., Callier, P., Jansen, J.-P. et de Biseau, J.-C. (2008). Intraguild predation by *Harmonia axyridis* on coccinellids revealed by exogenous alkaloid sequestration. *Chemoecology*, 18(3), 191-196.
- Hautier, L., San Martin, G., Callier, P., de Biseau, J. C. et Grégoire, J. C. (2011). Alkaloids provide evidence of intraguild predation on native coccinellids by *Harmonia axyridis* in the field. *Biological Invasions*, 13(8), 1805-1814.
- Head, R., Neel, W., Sartor, C. et Chambers, H. (1977). Methyl parathion and carbaryl resistance in *Chrysomela scripta* and *Coleomegilla maculata*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 17(2), 163-164.
- Hemptinne, J. L., Dixon, A. F. G. et Gauthier, C. (2000). Nutritive cost of intraguild predation on eggs of *Coccinella septempunctata* and *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 97(4), 559-562.

- Hemptinne, J. L., Lognay, G., Gauthier, C. et Dixon, A. (2000). Role of surface chemical signals in egg cannibalism and intraguild predation in ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae). *Chemoecology*, 10(3), 123-128.
- Hernandez, R., Harris, M. et Liu, T. X. (2011). Impact of insecticides on parasitoids of the leafminer, *Liriomyza trifolii*, in pepper in south Texas. *Journal of Insect Science*, 11.
- Hertfordshire, U. O. (2017). *Pesticide Properties DataBase. Chlorantraniliprole*. Récupéré de <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/1138.htm>
- Hilbeck, A. et Kennedy, G. G. (1996). Predators feeding on the Colorado potato beetle in insecticide-free plots and insecticide-treated commercial potato fields in eastern North Carolina. *Biological Control*, 6(2), 273-282.
- Hodek, I. (2012). Diapause/Dormancy. Dans I. Hodek, H. F. Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae)* (chap. 6, p. 275-342). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Hodek, I. et Evans, E. W. (2012). Food relationships. Dans I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)* (chap. 5, p. 110-140). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Hodek, I. et Honêk, A. (1996). *Ecology of Coccinellidae*. (s.l.) : Springer Netherlands.
- Hodek, I., Honêk, A. et van Emden, H. F. (2012). *Ecology and behaviour of the ladybird beetles (Coccinellidae)*. Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Hodgson, E. W., Pitts-Singer, T. L. et Barbour, J. D. (2011). Effects of the insect growth regulator, novaluron on immature alfalfa leafcutting bees, *Megachile rotundata*. *Journal of Insect Science*, 11(1), 43.
- Holt, R. D. et Polis, G. A. (1997). A theoretical framework for intraguild predation. *American Naturalist*, 149, 745-764.
- Honêk, A. (2012). Distribution and Habitats. Dans I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles* (p. 110-140). Chichester, UK : John Wiley & Sons.

- Hulbert, D., Isaacs, R., Vandervoort, C. et Wise, J. C. (2011). Rainfastness and Residual Activity of Insecticides to Control Japanese Beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) in Grapes. *Journal of Economic Entomology*, 104(5), 1656-1664.
- Inderjit. (2005). Plant invasions: Habitat Invasibility and Dominance of Invasive Plant Species. *Plant & Soil*, 277(1/2), 1-5.
- Institut de la statistique du Québec et Ministère de l'Agriculture, de Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2016). Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec. Dans *Agriculture et industrie bioalimentaire*. Récupéré de <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-bioalimentaire2016.pdf>
- IOBC-WPRS. (2008). *IOBC Pesticide Side Effect Database*. Récupéré de [http://www.iobc-wprs.org/restricted\\_member/toolbox.cfm](http://www.iobc-wprs.org/restricted_member/toolbox.cfm)
- IRAC. (2017). The IRAC Mode of Action Classification. Dans *Resistance Management for Sustainable Agriculture and Improved Public Health*. Récupéré de <http://www.irac-online.org/modes-of-action/>
- Ishaaya, I. et Horowitz, A. (1998). Insecticides with novel modes of action: an overview. Dans *Insecticides with novel modes of action* (p. 1-24). (s.l.) : Springer Berlin Heidelberg.
- Ishaaya, I., Kontsedalov, S. et Horowitz, A. R. (2003). Novaluron (Rimon), a novel IGR: potency and cross-resistance. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 54(4), 157-164.
- Jakob, C. et Poulin, B. (2016). Indirect effects of mosquito control using Bti on dragonflies and damselflies (Odonata) in the Camargue. *Insect Conservation and Diversity*, 9: 161–169
- James, D. G. (2003). Pesticide susceptibility of two coccinellids (*Stethorus punctum picipes* and *Harmonia axyridis*) important in biological control of mites and aphids in Washington hops. *Biocontrol science and technology*, 13(2), 253-259.

- Janssen, A., Sabelis, M. W., Magalhães, S., Montserrat, M. et Van der Hammen, T. (2007). Habitat structure affects intraguild predation. *Ecology*, 88(11), 2713-2719.
- Jeanguenat, A. (2013). The story of a new insecticidal chemistry class: The diamides. *Pest Management Science*, 69(1).
- JMP. (2015). *SAS Institute Inc.* (version 12.1). Cary, NC.
- Junges, C. M., Maglianese, M. I., Lajmanovich, R. C., Peltzer, P. M. et Attademo, A. M. (2017). Acute Toxicity and Etho-toxicity of Three Insecticides Used for Mosquito Control on Amphibian Tadpoles. *Water, Air, & Soil Pollution*. 228, 143.
- Kabaluk, J., Vernon, R. et Henderson, D. (2006). Population development of the green peach aphid and beneficial insects in potato fields in British Columbia. *The Canadian Entomologist*, 138(05), 647-660.
- Kajita, Y., Obrycki, J., Sloggett, J. et Haynes, K. (2010). Intraspecific alkaloid variation in ladybird eggs and its effects on con- and hetero-specific intraguild predators. *Oecologia*, 163(2), 313-322.
- Kästel, A., Allgeier, S. et Brühl, C. A. (2017). Decreasing *Bacillus thuringiensis israelensis* sensitivity of *Chironomus riparius* larvae with age indicates potential environmental risk for mosquito control. *Scientific Reports*, 7, 13565
- Ker, K. W., Pickering, G. J. et Dris, R. (2005). *Biology and control of the novel grapevine pest-The multicolored Asian lady beetle Harmonia axyridis* (pp. 991-997) : WFL Publisher Helsinki, Finland.
- Kleinbaum, D. G. et Klein, M. (2012). *Survival Analysis : A Self-Learning Text* (Third Edition éd.). New York : Springer.
- Koch, R., Burkness, E., Burkness, S. J. W. et Hutchison, W. (2004). Phytophagous preferences of the multicolored Asian lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae) for autumn-ripening fruit. *Journal of Economic Entomology*, 97(2), 539-544.

- Koch, R. L. (2003). The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: a review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts. *Journal of Insect Science*, 3(32), 1-16.
- Koch, R. L. et Galvan, T. L. (2008). Bad side of a good beetle: the North American experience with *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53(1), 23-35.
- Kogan, M. (1998). Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 243-270.
- Kolar, C. S. et Lodge, D. M. (2001). Progress in invasion biology: predicting invaders. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(4), 199-204.
- Kraiss, H. et Cullen, E. M. (2008). Efficacy and nontarget effects of reduced-risk insecticides on *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) and its biological control agent *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Economic Entomology*, 101(2), 391-398.
- Krupke, C. H., Hunt, G. J., Eitzer, B. D., Andino, G. et Given, K. (2012). Multiple routes of pesticide exposure for honey bees living near agricultural fields. *PLoS One*, 7(1), e29268.
- Labrie, G. (2007). *Les mécanismes d'invasion de la coccinelle asiatique Harmonia axyridis Pallas au Québec*. Université de Québec à Montréal. (1524)
- Labrie, G., Coderre, D. et Lucas, E. (2008). Overwintering strategy of multicolored Asian lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae): cold-free space as a factor of invasive success. *Annals of the Entomological Society of America*, 101(5), 860-866.
- Labrie, G., Legault, N., Courchesne, F., Coderre, D. et Lucas, É. (2014). Instar-specific vulnerability of *Harmonia axyridis* to intraguild predation. (*Sous presse*).
- Labrie, G., Lucas, E. et Coderre, D. (2006). Can developmental and behavioral characteristics of the multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* explain its invasive success? *Biological Invasions*, 8(4), 743-754.
- Lahm, G. P., Cordova, D. et Barry, J. D. (2009). New and selective ryanodine receptor activators for insect control. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 17(12), 4127-4133.



- Lamana, M. L. et Miller, J. C. (1998). Temperature-dependent development in an Oregon population of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 27(4), 1001-1005.
- Larochelle, A. (1979). *Les coléoptères coccinellidae du Québec*. (s.l.) : A. Larochelle.
- Lau, D. (2014). Selected Pesticides' effects on the Convergent lady beetle (*Hippodamia convergens*).
- Lefebvre, M., Bostanian, N. J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. A. et Hardman, J. M. (2012). Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Journal of Economic Entomology*, 105(3), 866-871.
- Lefebvre, M., Bostanian, N. J., Thistlewood, H. M., Mauffette, Y. et Racette, G. (2011). A laboratory assessment of the toxic attributes of six 'reduced risk insecticides' on *Galendromus occidentalis* (Acari: Phytoseiidae). *Chemosphere.*, 84(1), 25-30.
- Léger-Beaulieu, C., Cabrera, P. et Lucas, É. (2015). Impact du Novaluron sur la nymphose chez *C. maculata* et *H. axyridis*. Rapport pour le cours Initiation à la recherche. Université du Québec à Montréal.
- Legifrance. LOI N° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (1) - Article 125 (2016).
- Linder, C., Lorenzini, F. et Kehrl, P. (2009). Potential impact of processed *Harmonia axyridis* on the taste of 'Chasselas' and 'Pinot noir' wines. *Vitis*, 48(2), 101-102.
- Liu, F., Zhang, X., Gui, Q. Q. et Xu, Q. J. (2012). Sublethal effects of four insecticides on *Anagrus nilaparvatae* (Hymenoptera: Mymaridae), an important egg parasitoid of the rice planthopper *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Crop Protection*, 37, 13-19.
- Liu, T. X. et Zhang, Y. (2012). Side effects of two reduced-risk insecticides, indoxacarb and spinosad, on two species of Trichogramma (Hymenoptera: Trichogrammatidae) on cabbage. *Ecotoxicology*, 21(8), 2254-2263.

- Lixa, A. T., Campos, J. M., Resende, A. L. S., Silva, J. C., Almeida, M. M. et Aguiar-Menezes, E. L. (2010). Diversity of coccinellidae (Coleoptera) using aromatic plants (Apiaceae) as survival and reproduction sites in agroecological system. *Neotropical Entomology*, 39(3), 354-359.
- Long, E. Y. et Finke, D. L. (2014). Contribution of predator identity to the suppression of herbivores by a diverse predator assemblage. *Environmental Entomology*, 43(3), 569-576.
- Lucas, É. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102, 351-364.
- Lucas, É. (2012). Intraguild interactions. Dans I. Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)*. (p. 343-374). Chichester : John Wiley & Sons.
- Lucas, É., Coderre, D. et Brodeur, J. (1998). Intraguild predation among aphid predators: Characterization and influence of extraguild prey density. *Ecology*, 79(3), 1084-1092.
- Lucas, É., Coderre, D. et Vincent, C. (1997). Voracity and feeding preferences of two aphidophagous coccinellids on *Aphis citricola* and *Tetranychus urticae*. *Entomologia experimentalis et applicata*, 85(2), 151-159.
- Lucas, E., Demougeot, S., Vincent, C. et Coderre, D. (2004). Predation upon the oblique-banded leafroller, *Choristoneura rosaceana* (Lepidoptera: Tortricidae), by two aphidophagous coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae) in the presence and absence of aphids. *European Journal of Entomology*, 101(1), 37-42.
- Lucas, E., Gagne, I. et Coderre, D. (2002). Impact of the arrival of *Harmonia axyridis* on adults of *Coccinella septempunctata* and *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 99(4), 457-463.
- Lucas, E., Giroux, S., Demougeot, S., Duchesne, R. M. et Coderre, D. (2004). Compatibility of a natural enemy, *Coleomegilla maculata lengi* (Col., Coccinellidae) and four insecticides used against the Colorado potato beetle (Col., Chrysomelidae). *Journal of Applied Entomology*, 128(3), 233-239.

- Lucas, E. et Maisonhaute, J.-E. (2014). Paysage et services écosystémiques, une nouvelle dimension dans la lutte aux insectes nuisibles. Dans J. Ruiz et G. Domon (dir.), *Agriculture et paysage, Aménager autrement les territoires ruraux* (p. 175-196). Les Presses de l'Université de Montréal.
- Lucas, É. et Rosenheim, J. A. (2011). Influence of extraguild prey density on intraguild predation by heteropteran predators: A review of the evidence and a case study. *Biological Control*, 59(1), 61-67.
- Lucas, E., Vincent, C., Labrie, G., Chouinard, G., Fournier, F., Pelletier, F., . . . Lafontaine, P. (2007). The multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in Quebec agroecosystems ten years after its arrival. *European Journal of Entomology*, 104(4), 737.
- Lundgren, J. G., Razzak, A. A. et Wiedenmann, R. N. (2004). Population responses and food consumption by predators *Coleomegilla maculata* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) during anthesis in an Illinois cornfield. *Environmental Entomology*, 33(4), 958-963.
- Lundgren, J. G. et Seagraves, M. P. (2011). Physiological benefits of nectar feeding by a predatory beetle. *Biological Journal of the Linnean Society*, 104(3), 661-669.
- Lundgren, J. G. et Wiedenmann, R. N. (2002). Coleopteran-specific Cry3Bb toxin from transgenic corn pollen does not affect the fitness of a nontarget species, *Coleomegilla maculata* DeGeer (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental entomology*, 31(6), 1213-1218.
- Lundgren, J. G. et Wiedenmann, R. N. (2005). Tritrophic Interactions Among Bt (Cry3Bb1) Corn, Aphid Prey, and the Predator *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 34(6), 1621-1625.
- Mack, R. N., Simberloff, D., Mark Lonsdale, W., Evans, H., Clout, M. et Bazzaz, F. A. (2000). Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological applications*, 10(3), 689-710.
- Mack, T. et Smilowitz, Z. (1982). CMACSIM, a Temperature-Dependent Predator-Prey Model Simulating the Impact of *Coleomegilla maculata* (DeGeer) on Green Peach Aphids on Potato Plants. *Environmental Entomology*, 11(6), 1193-1201.

- Malagnoux, L., Capowiez, Y. et Rault, M. (2015). Impact of insecticide exposure on the predation activity of the European earwig *Forficula auricularia*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(18), 14116-14126.
- McDonald, J. H. (2014). *Handbook of Biological Statistics. Chi-square test of independence*. Récupéré de <http://www.biostathandbook.com/chiind.html>
- McKay, T. (2018). French ban on neonicotinoid pesticides, which bees may find addictive, goes into effect. *Gizmodo*. Récupéré de <https://gizmodo.com/french-ban-on-neonicotinoid-pesticides-which-bees-may-1828767042>
- Medina, P., Adán, A., Del Estal, P., Budia, F. et Viñuela, E. (2008). Integración del control biológico con otros métodos de control. Dans J. Jacas et A. Urbaneja (dir.), *Control Biológico de Plagas Agrícolas* (chap. 31, p. 469-476). España : Phytoma.
- Mesnage, R., Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J. et Séralini, G.-E. (2014). Major pesticides are more toxic to human cells than their declared active principles. *BioMed research international*.
- Michaud, J. (2002a). Invasion of the Florida citrus ecosystem by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and asymmetric competition with a native species, *Cycloneda sanguinea*. *Environmental Entomology*, 31(5), 827-835.
- Michaud, J. (2002b). Relative toxicity of six insecticides to *Cycloneda sanguinea* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Entomological Science*, 37(1), 83-93.
- Michaud, J. P. (2012). Coccinellids in biological control. Dans I Hodek, H. F. van Emden et A. Honêk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae)* (p. 488-519). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Mills, N. J., Beers, E. H., Shearer, P. W., Unruh, T. R. et Amarasekare, K. G. (2016). Comparative analysis of pesticide effects on natural enemies in western orchards: A synthesis of laboratory bioassay data. *Biological Control*, 102, 17-25.
- Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2002). *L'utilisation des pesticides dans les vergers*

de pommiers. Récupéré de  
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/pesticides/verger/index.htm>

Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015). *Stratégie québécoise sur les pesticides 2015-2018*. Récupéré de  
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/pesticides/strategie2015-2018/strategie.pdf>

Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2017a). *Présence de pesticides dans l'eau au Québec - Zones de vergers et de pommes de terre, 2010 à 2012*. Récupéré de  
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/ministre/inter.htm>

Ministère de Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques . (2017b). Bilan des ventes de pesticides au Québec 2015. Récupéré de  
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/pesticides/bilan/index.htm>

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2014). *Indicateur de la gestion intégrée des ennemis des cultures. Résultats 2012*. Gouvernement du Québec. Récupéré de  
<https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/89104>

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2017a). Traitements phytosanitaires et risques associés. Insecticides et acaricides homologués dans Pomme, pour lutter contre le Puceron vert du pêcher. Dans *SAGÉ Pesticides*. Récupéré de <http://www.sagepesticides.qc.ca>

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2017b). Effets toxiques des matières actives. Dans *SAGÉ Pesticides*. Récupéré de <http://www.sagepesticides.qc.ca>

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2017c). Traitements phytosanitaires et risques associés. Insecticides et acaricides homologués dans Pomme. Dans *SAGÉ Pesticides*. Récupéré de <http://www.sagepesticides.qc.ca>

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2018). Production fruitière intégrée - PFI. Dans *SAGÉ Pesticides*. Récupéré de <http://www.sagepesticides.qc.ca>
- Mirande, L., Desneux, N., Haramboure, M. et Schneider, M. (2015). Intraguild predation between an exotic and a native coccinellid in Argentina: the role of prey density. *Journal of Pest Science*, 88(1), 155-162.
- Mommaerts, V., Sterk, G. et Smaghe, G. (2006). Hazards and uptake of chitin synthesis inhibitors in bumblebees *Bombus terrestris*. *Pest Management Science*, 62(8), 752-758.
- Mooney, H. A. et Cleland, E. E. (2001). The evolutionary impact of invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(10), 5446-5451.
- Morales-Ramos, J. A. et Rojas, M. G. (2017). Temperature-Dependent Biological and Demographic Parameters of *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Insect Science*, 17(2), 55-55.
- Morin, Y. et Chouinard, G. (2015). Les pucerons. Fiche 78. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Morin, Y., Cormier, D. et Chouinard, G. (2017). Le carpocapse de la pomme. Fiche 76. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseaupommier/?p=10051>
- Moscardini, V. F., Gontijo, P. C., Michaud, J. P. et Carvalho, G. A. (2014). Sublethal effects of chlorantraniliprole and thiamethoxam seed treatments when *Lysiphlebus testaceipes* feed on sunflower extrafloral nectar. *BioControl*, 59(5), 503-511.
- Moscardini, V. F., Gontijo, P. C., Michaud, J. P. et Carvalho, G. A. (2015). Sublethal effects of insecticide seed treatments on two nearctic lady beetles (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecotoxicology*, 24(5), 1152-1161.
- Moser, S. E., Harwood, J. D. et Obrycki, J. J. (2008). Larval feeding on Bt hybrid and non-Bt corn seedlings by *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) and *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 37(2), 525-533.

- Mouches, C., Pauplin, Y., Agarwal, M., Lemieux, L., Herzog, M., Abadon, M., . . . Pasteur, N. (1990). Characterization of Amplification Core and Esterase B1 Gene Responsible for Insecticide Resistance in *Culex*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(7), 2574-2578.
- Müller, C. B. et Brodeur, J. (2002). Intraguild predation in biological control and conservation biology. *Biological Control*, 25(3), 216-223.
- Murillo, H. (2014). Predation of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) eggs in cotton and corn in El Espinal, Tolima, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 40(1), 63-66.
- Musser, F. R. et Shelton, A. M. (2003). Predation of *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) eggs in sweet corn by generalist predators and the impact of alternative foods. *Environmental Entomology*, 32(5), 1131-1138.
- Nauen, R. (2006). Insecticide mode of action: return of the ryanodine receptor. *Pest Management Science*, 62(8), 690-692.
- Nawaz, M., Cai, W., Jing, Z., Zhou, X., Mabubu, J. I. et Hua, H. (2017). Toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on the development and fecundity of a non-specific predator, the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas). *Chemosphere*, 178, 496-503.
- Nedvěd, O., Háva, J. et Kulíková, D. (2011). Record of the invasive alien ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera, Coccinellidae) from Kenya. *ZooKeys*, 106, 77.
- Nedvěd, O. et Honěk, A. (2012). Life history and development. Dans I. Hodek, H. F. Van Emden et A. Honěk (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird beetles (Coccinellidae)* (p. 54-109). Chichester, UK : John Wiley & Sons.
- Nedvěd, O., Kalushkov, P., Fois, X., Ungerová, D. et Rozsypalová, A. (2010). *Harmonia axyridis*: six-legged alligator or lethal fugu. *IOBC-WPRS Bulletin*, 58, 65-68.
- Oberlander, H. et Silhacek, D. L. (1998). New Perspectives on the Mode of Action of Benzoylphenyl Urea Insecticides. Dans I. Ishaaya et D. Degheele (dir.), *Insecticides with Novel Modes of Action: Mechanisms and Application* (p. 92-105). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

- Olszak, R. W., Ceryngier, P. et Warabieda, W. (2004). Influence of some pesticides on fecundity and longevity of *Coccinella septempunctata* and *Adalia bipunctata* (Col., Coccinellidae) under laboratory conditions. *Pesticides & Beneficial Organisms IOBC/WPRS Bulletin*, 27, 105.
- Olszak, R. W. et Sekrecka, M. (2008). Influence of some insecticides and acaricides on beneficial mites and on *Coccinella septempunctata* (Coleoptera; Coccinellidae) larvae. *Pesticides & Beneficial Organisms IOBC/WPRS Bulletin*, 35, 101-108.
- Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. (2011). *Codling moth*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/codling.htm>
- PAN. (2000-2016). *PAN Pesticides Database - Pesticide Products*. Récupéré de [http://www.pesticideinfo.org/List\\_Products.jsp?Rec\\_Id=PC41373&Chem\\_Name=Chlorantraniliprole&PC\\_Code=090100](http://www.pesticideinfo.org/List_Products.jsp?Rec_Id=PC41373&Chem_Name=Chlorantraniliprole&PC_Code=090100)
- Pejchar, L. et Mooney, H. A. (2009). Invasive species, ecosystem services and human well-being. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 497-504.
- Pell, J. K., Baverstock, J., Roy, H. E., Ware, R. L. et Majerus, M. E. N. (2008). Intraguild predation involving *Harmonia axyridis* : a review of current knowledge and future perspectives. . Dans H. E. Roy et E. Wajnberg (dir.), *From Biological Control to Invasion: the Ladybird Harmonia axyridis as a Model Species* (p. 147-168). Springer Netherlands.
- Pener, M. P. et Dhadialla, T. S. (2012). An overview of insect growth disruptors; applied aspects. *Advance in Insect Physiology*, 43, 1-162.
- Pereira, R. R., Picanço, M. C., Santana, P. A., Moreira, S. S., Guedes, R. N. C. et Corrêa, A. S. (2014). Insecticide toxicity and walking response of three pirate bug predators of the tomato leaf miner *Tuta absoluta*. *Agricultural and Forest Entomology*, 16(3), 293-301.
- Pervez, A. et Gupta, A. (2004). Role of surface chemicals in egg cannibalism and intraguild predation by neonates of two aphidophagous ladybirds, *Propylea dissecta* and *Coccinella transversalis*. *Journal of Applied Entomology*, 128(9-10), 691-695.



- Philion, V. (2016a). *La tavelure : biologie. Fiche 100*. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseau-pommier/?p=10051>
- Philion, V. (2016b). Le feu bactérien : biologie. Fiche 104. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseau-pommier/?p=10051>
- Philion, V., Morin, Y. et Maheux, R. (2016). Description des produits antibiotiques, de lutte biologique et éliciteurs. Fiche 49. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée 2016*. Récupéré de <http://web2.irda.qc.ca/reseau-pommier/?p=10051>
- Philogène, B. J. R., Fabres, G. et Regnault-Roger, C. (2005). Protection des cultures, environnement et développement durable: enjeux pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Dans C. Regnault-Roger (dir.), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement* (p. 1-14). Cahors, France : Lavoisier.
- Pickering, G., Spink, M., Kotseridis, Y., Brindle, I., Sears, M. et Inglis, D. (2008). The influence of *Harmonia axyridis* morbidity on 2-Isopropyl-3-methoxy-pyrazine in 'Cabernet Sauvignon' wine. *Vitis*, 47(4), 227-230.
- Pitts-Singer, T. L. et Barbour, J. D. (2017). Effects of residual novaluron on reproduction in alfalfa leafcutting bees, *Megachile rotundata* F. (Megachilidae). *Pest Management Science*, 73(1), 153-159.
- Pitts-Singer, T. L. et Barbour, J. D. (2017). Effects of residual novaluron on reproduction in alfalfa leafcutting bees, *Megachile rotundata* F. (Megachilidae). *Pest Management Science*, 73(1), 153-159.
- Polis, G. A. et Holt, R. D. (1992). Intraguild Predation - The Dynamics of Complex Trophic Interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 7(5), 151-154.
- Polis, G. A., Myers, C. A. et Holt, R. D. (1989). The Ecology and Evolution of Intraguild Predation - Potential Competitors That Eat Each Other. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 297-330.
- Poulin, B., Lefebvre, G. et Paz, L. (2010). Red flag for green spray: adverse trophic effects of Bti on breeding birds. *Journal of Applied Ecology*, 47, 884-889

- Pozzebon, A. et Duso, C. (2010). *Pesticide side-effects on predatory mites: the role of trophic interactions* Springer Netherlands.
- Preetha, G., Stanley, J., Suresh, S., Kuttalam, S. et Samiyappan, R. (2009). Toxicity of selected insecticides to *Trichogramma chilonis*: Assessing their safety in the rice ecosystem. *Phytoparasitica*, 37(3), 209-215.
- Prescott, K. K. et Andow, D. A. (2016). Lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae) communities in soybean and maize. *Environmental Entomology*, 45(1), 74-82.
- Producteurs de pommes du Québec (2017a). Organisation. Dans *Les Producteurs de pommes du Québec : Filière pomicole du Québec*. Récupéré de <http://producteursdepommesduquebec.ca/federation/organisation/>
- Producteurs de pommes du Québec. (2017b). Production fruitière intégrée (PFI). Dans *Les Producteurs de pommes du Québec : Filière pomicole du Québec*. Récupéré de <http://producteursdepommesduquebec.ca/environnement/production-fruiterie-integree-pfi/>
- Provost, C., Coderre, D., Lucas, É. et Bostanian, N. J. (2003a). Impact d'une dose subletale de lambda-cyhalothrine sur les prédateurs intraguildes d'acariens phytophages en verger de pommiers. *Phytoprotection*, 84, 105-113.
- Provost, C., Coderre, D., Lucas, É. et Bostanian, N. J. (2003b). Impact of lambda-cyhalothrin on intraguild predation among three mite predators. *Environmental Entomology*, 32(2), 256-263.
- Ramos, R. S., Sedyama, C. S., Queiroz, E. A., Costa, T. L., Martins, J. C., Araújo, T. A. et Picanço, M. C. (2017). Toxicity of insecticides to *Chrysodeixis includens* and their direct and indirect effects on the predator *Blaptostethus pallenscens*. *Journal of Applied Entomology*, 141(9), 677-689.
- Reding, M. E. et Ranger, C. M. (2011). Systemic Insecticides Reduce Feeding, Survival, and Fecundity of Adult Black Vine Weevils (Coleoptera: Curculionidae) on a Variety of Ornamental Nursery Crops. *Journal of Economic Entomology*, 104(2), 405-413.

- Regnault-Roger, C. et Philogène, B. J. R. (2005). Évolution des insecticides organiques de synthèse. Dans C. Regnault-Roger, G. Fabres et B. J. R. Philogène (dir.), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement* (chap. 1, p. 19-43). France : Lavoisier.
- Ricci, P., Lamine, C. et Bui, S. (2011). La gestión de la santé des cultures dans une optique de développement durable. Dans P. Ricci, S. Bui et C. Lamine (dir.), *Repenser la protection des cultures : innovations et transitions* (p. 17-28). Paris, France : Educagri éditions.
- Rieder, J. P., Newbold, T. S., Sato, S., Yasuda, H. et Evans, E. W. (2008). Intra-guild predation and variation in egg defence between sympatric and allopatric populations of two species of ladybird beetles. *Ecological Entomology*, 33(1), 53-58.
- Roger, C., Vincent, C. et Coderre, D. (1995). Mortality and predation efficiency of *Coleomegilla maculata lengi* Timb. (Col., Coccinellidae) following application of Neem extracts (*Azadirachta indica* A. Juss., Meliaceae). *Journal of Applied Entomology*, 119(1-5), 439-443.
- Rosenheim, J. A. (1998). Higher-order predators and the regulation of insect herbivore populations. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 421-447.
- Rosenheim, J. A., Kaya, H. K., Ehler, L. E., Marois, J. J. et Jaffee, B. A. (1995). Intraguild Predation Among Biological-Control Agents: Theory and Evidence. *Biological Control*, 5(3), 303-335.
- Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C. R. et Isaacs, R. (2014). Mitigating the effects of insecticides on arthropod biological control at field and landscape scales. *Biological Control*, 75(0), 28-38.
- Roy, H., Brown, P. et Majerus, M. (2006). *Harmonia axyridis*: a successful biocontrol agent or an invasive threat? Dans J. Eilenberg et H. M. Hokkanen (dir.), *An ecological and societal approach to biological control* (vol. 2, p. 295-309). Dordrecht : Springer.
- Roy, H. et Wajnberg, E. (2008). From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species. *BioControl*, 53(1), 1-4.

- Roy, H. E., Brown, P. M. J., Adriaens, T., Berkvens, N., Borges, I., Clusella-Trullas, S., . . . Zhao, Z. (2016). The harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*: global perspectives on invasion history and ecology. *Biological Invasions*, 18(4), 997-1044.
- Rundlöf, M., Andersson, G. K., Bommarco, R., Fries, I., Hederström, V., Herbertsson, L., . . . Yourstone, J. (2015). Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees. *Nature*, 521(7550), 77-80.
- Sakai, A. K., Allendorf, F. W., Holt, J. S., Lodge, D. M., Molofsky, J., With, K. A., . . . Ellstrand, N. C. (2001). The population biology of invasive species. *Annual review of ecology and systematics*, 32(1), 305-332.
- Samuel, H. (2018). France becomes first country in Europe to ban all five pesticides killing bees. *The telegraph*. Récupéré de <https://www.telegraph.co.uk/news/2018/08/31/france-first-ban-five-pesticides-killing-bees/>
- Samuel, O., Dion, S. et St-Laurent, L. (2012). *Indicateur de risque de pesticides du Québec: IRPeQ: santé et environnement (2e édition)*. Québec, Canada : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec/Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs/Institut national de santé publique du Québec. Récupéré de [https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1504\\_IndicRisquesPesticides\\_2eEdition.pdf](https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1504_IndicRisquesPesticides_2eEdition.pdf)
- Santé Canada. (2002). *Directive d'homologation : Initiative de l'ARLA concernant les pesticides à risque réduit*. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/politiques-lignes-directrices/directive-homologation/2002/nitiative-arla-concernant-pesticides-risque-reduit-dir2002-02.html#programmes>
- Santé Canada. (2008). *Rapport d'Évaluation ER2008-03: Chlorantraniliprole*. Récupéré de <http://www.pmra-arla.gc.ca/francais/pdf/erc/er2008-03-fra.pdf>

- Santé Canada. (2009a). *La catégorie d'utilisation (CU n° 14) : Cultures en milieu terrestre destinées à la consommation humaine - Matière active de qualité technique*. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/pesticides-lutte-antiparasitaire/titulaires-demandeurs/homologation-nouveaux-produits/serie-categories-utilisation-tableau-codo/categorie-utilisation-14-matiere-active-qualite-technique.html>
- Santé Canada. (2009b). *Sécurité des produits de consommation. Directive d'homologation : Organisation et présentation des renseignements dans les demandes d'homologation des produits antiparasitaires*. Récupéré de [http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/\\_pol-guide/dir2003-01/index-fra.php#defn](http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_pol-guide/dir2003-01/index-fra.php#defn)
- Santé Canada. (2014a). *Rapport sur les ventes de produits antiparasitaires en 2014*. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/plans-rapports/rapport-concernant-ventes-produits-antiparasitaires-2014.html>
- Santé Canada. (2014b). *Décision d'homologation RD2014-10, Novaluron*. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/decisions-mises-jour/decision-homologation/2014/novaluron-rd2014-10.html>
- Santé Canada. (2015). *ACELEPRYN™ Insecticide. Label Canadien*
- Santos, L. D., Santos-Cividanes, T. M., Cividanes, F. J. et Matos, S. T. (2013). Biological aspects of *Harmonia axyridis* in comparison with *Cycloneda sanguinea* and *Hippodamia convergens*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(11), 1419-1425.
- Schmidt-Jeffris, R. A. et Nault, B. A. (2016). Anthranilic diamide insecticides delivered via multiple approaches to control vegetable pests: A case study in snap bean. *Journal of Economic Entomology*, 109(6), 2479-2488.

- Schneider, M.I., N. Sanchez, S. Pineda, H. Chi, et A. Ronco. (2009). Impact of glyphosate on the development, fertility and demography of *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae): Ecological approach. *Chemosphere*, 76: 1451-1455.
- Shaw, P. W. et Wallis, D. R. (2010). Susceptibility of the European earwig, *Forficula auricularia* to insecticide residues on apple leaves. *New Zealand Plant Protection Society*, 63, 55-59.
- Shearer, P. W., Amarasekare, K. G., Castagnoli, S. P., Beers, E. H., Jones, V. P. et Mills, N. J. (2016). Large-plot field studies to assess impacts of newer insecticides on non-target arthropods in Western U.S. orchards. *Biological Control*, 102(Supplement C), 26-34.
- Sidhu, J. K., Hardke, J. T. et Stout, M. J. (2014). Efficacy of dermacor-X-100® seed treatment against *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) on rice. *Florida Entomologist*, 97(1), 224-232.
- Sloggett, J. J. et Davis, A. J. (2010). Eating chemically defended prey: Alkaloid metabolism in an invasive ladybird predator of other ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Experimental Biology*, 213(2), 237-241.
- Smith, B. (1960). A technique for rearing coccinellid beetles on dry foods, and influence of various pollens on the development of *Coleomegilla maculata* lengi Timb.(Coleoptera: Coccinellidae). *Canadian Journal of Zoology*, 38(6), 1047-1049.
- Smith, E. et Kennedy, G. (2002). History of Pesticides. Dans D. Pimentel (dir.), *Encyclopedia of Pest Management*. (s.l.) : CRC Press.
- Smith, R. F., Apple, J. L. et Bottrell, D. G. (1976). The origins of integrated pest management concepts for agricultural crops. Dans J. L. Apple et R. F. Smith (dir.), *Integrated Pest Management* (p. 1-16). New York, É-U : Plenum Press.
- Smith, S. et Krischik, V. (1999). Effects of systemic imidacloprid on *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 28(6), 1189-1195.

- Snyder, W. E., Clevenger, G. M. et Eigenbrode, S. D. (2004). Intraguild predation and successful invasion by introduced ladybird beetles. *Oecologia*, 140(4), 559-565.
- Snyder, W. E. et Evans, E. W. (2006). Ecological effects of invasive arthropod generalist predators. *Annual Review of Ecology, Evolution. and Systematics*, 37, 95-122.
- Soares, A. O., Borges, I., Borges, P. A., Labrie, G. et Lucas, É. (2008). *Harmonia axyridis*: What will stop the invader? *BioControl*, 53(1), 127-145.
- Sokal, R. et Rohlf, J. (1995). *Biometry : the principles and practice of statistics in biological research* (3<sup>rd</sup> ed. éd.). New York : New York W. H. Freeman.
- Sparks, T. C. (2013). Insecticide discovery: An evaluation and analysis. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(1), 8-17.
- Stals, R. et Prinsloo, G. (2007). Discovery of an alien invasive, predatory insect in South Africa: the multicoloured Asian ladybird beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera: Coccinellidae). *South African Journal of Science*, 103(3-4), 123-126.
- Stanley, D. A., Russell, A. L., Morrison, S. J., Rogers, C. et Raine, N. E. (2016). Investigating the impacts of field-realistic exposure to a neonicotinoid pesticide on bumblebee foraging, homing ability and colony growth. *Journal of Applied Ecology*, 53(5), 1440-1449.
- Stark, J. D. et Banks, J. E. (2003). Population-level effects of pesticides and other toxicants on arthropods. *Annual Review of Entomology*, 48(1), 505-519.
- Stark, J. D., Banks, J. E. et Acheampong, S. (2004). Estimating susceptibility of biological control agents to pesticides: influence of life history strategies and population structure. *Biological control*, 29(3), 392-398.
- Strayer, D. L., Eviner, V. T., Jeschke, J. M. et Pace, M. L. (2006). Understanding the long-term effects of species invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(11), 645-651.
- Tait, J. (2001). Pesticide regulation, product innovation and public attitudes. *Journal of Environmental Monitoring*, 3, 64N-69N.

- Talebi, K., Kavousi, A. et Sabahi, Q. (2008). Impacts of pesticides on arthropod biological control agents. *Pest Technology*, 2(2), 87-97.
- Tedders, W. et Schaefer, P. (1994). Release and establishment of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) in the southeastern United States. *Entomological News*, 105(4), 228-243.
- Tillman, P. G. et Cottrell, T. E. (2012). Incorporating a sorghum habitat for enhancing lady beetles (Coleoptera: Coccinellidae) in cotton. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012.
- Tome, H. V. V., Barbosa, W. F., Corrêa, A. S., Gontijo, L. M., Martins, G. F. et Guedes, R. N. C. (2015). Reduced-risk insecticides in Neotropical stingless bee species: Impact on survival and activity. *Annals of Applied Biology*, 167(2), 186-196.
- Tourneur, J. C., Bouchard, D. et Pilon, J. G. (1991). Le complexe des ennemis naturels des pucerons en pommeraie au Québec. Dans C. Vincent et D. Coderre (dir.), *La Lutte biologique* (p. 179-193). Boucherville, Québec : G. Morin.
- Trisyono, A., Puttler, B. et Chippendale, G. M. (2000). Effect of the ecdysone agonists, methoxyfenozide and tebufenozide, on the lady beetle, *Coleomegilla maculata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 94(1), 103-105.
- Tunaz, H. et Uygun, N. (2004). Insect growth regulators for insect pest control. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(6), 377-387.
- Règlement Concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil, (CE) No 1107/2009 C.F.R. (2009). Union Européenne.
- Règlement D'Exécution (UE) No 485/2013 de la Commission (2013). Union Européenne.
- Valéry, L., Fritz, H., Lefevre, J.-C. et Simberloff, D. (2008). In search of a real definition of the biological invasion phenomenon itself. *Biological Invasions*, 10(8), 1345-1351.



- Vandereycken, A., Durieux, D., Joie, É., Haubruge, É. et Verheggen, F. (2012). Habitat diversity of the Multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera: Coccinellidae) in agricultural and arboreal ecosystems: a review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16(4), 553-563.
- Van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57: 1-20.
- Vermeij, G. J. (1996). An agenda for invasion biology. *Biological conservation*, 78(1-2), 3-9.
- Vilà, M., Basnou, C., Pyšek, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., . . . Roy, D. (2010). How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(3), 135-144.
- Waddell, C. (2000). The reception of Silent Spring: An introduction. *And no birds sing: Rhetorical analyses of Rachel Carson's Silent Spring*, 1-16.
- Walsh, J. R., Carpenter, S. R. et Vander Zanden, M. J. (2016). Invasive species triggers a massive loss of ecosystem services through a trophic cascade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4081-4085.
- Wang, J., Li, Y., Han, Z., Zhu, Y., Xie, Z., Wang, J., . . . Li, X. (2012). Molecular characterization of a ryanodine receptor gene in the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *PLoS One*, 7(5), e36623.
- Ware, R., Yguel, B. et Majerus, M. (2009). Effects of competition, cannibalism and intra-guild predation on larval development of the European coccinellid *Adalia bipunctata* and the invasive species *Harmonia axyridis*. *Ecological Entomology*, 34(1), 12-19.
- Ware, R. L., Ramon-Portugal, F., Magro, A., Ducamp, C., Hemptinne, J.-L. et Majerus, M. E. (2008). Chemical protection of *Calvia quatuordecimguttata* eggs against intraguild predation by the invasive ladybird *Harmonia axyridis*. *BioControl*, 53(1), 189-200.

- Warreen, L. et Tadic, M. (1967). Biological observations on *Coleomegilla maculata* and its role as a predator of the fall webworm. *Journal of Economic Entomology*, 60(6), 1492-1496.
- Weddle, P. W., Welter, S. C. et Thomson, D. (2009). History of IPM in California pears, 50 years of pesticide use and the transition to biologically intensive IPM. *Pest management Science*, 65(12), 1287-1292.
- Williams, G. R., Troxler, A., Retschnig, G., Roth, K., Yañez, O., Shutler, D., . . . Gauthier, L. (2015). Neonicotinoid pesticides severely affect honey bee queens. *Scientific Reports*, 5.
- Witzgall, P., Stelinski, L., Gut, L. et Thomson, D. (2008). Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53, 503-522.
- Wright, R. et DeVries, T. (2000). Species composition and relative abundance of Coccinellidae (Coleoptera) in south central Nebraska field crops. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 103-111.
- Zhu, K. Y., Merzendorfer, H., Zhang, W., Zhang, J. et Muthukrishnan, S. (2016) Biosynthesis, Turnover, and Functions of Chitin in Insects. : Vol. 61. *Annual Review of Entomology* (pp. 177-196).
- Zotti, M. J., Grutzmacher, A. D., Lopes, I. H. et Smagghe, G. (2013). Comparative effects of insecticides with different mechanisms of action on *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae): Lethal, sublethal and dose-response effects. *Insect Science*, 20(6), 743-752.