

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACT DE DEUX INSECTICIDES À RISQUES RÉDUITS SUR LA GUILDE
DES ENNEMIS NATURELS APHIDIPHAGES EN VERGER DE POMMIERS AU
QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN BIOLOGIE

PAR
ALICE DE DONDER

AOÛT 2021

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie particulièrement mon directeur de recherche Éric Lucas et mes co-directeurs Daniel Cormier et Marcela Rodríguez García de m'avoir épaulé tout au long de ma maîtrise. Merci de votre soutien, votre confiance et d'avoir été disponible dans les moments de panique.

Je remercie également Marc Fournier pour ses précieux conseils, son efficacité et son calme légendaire. Le laboratoire de lutte biologique ne serait pas pareil sans toi!

Merci à Jill Vandermeerschen pour les précieux conseils avec les analyses statistiques.

Je remercie également les autres étudiants du laboratoire pour le soutien technique et moral. Merci particulièrement à Jonathan, je n'oublierai jamais la fois où tu es venu au verger m'aider à tailler les arbres et déplacer des pucerons jusqu'à la tombée de la nuit. Je n'aurai jamais réussi à faire mes expériences à temps sans ton aide précieuse.

Merci à ma famille de me soutenir de l'autre côté de l'océan. Malgré la distance vous êtes toujours là pour moi. Et finalement, merci à mon conjoint François. Merci pour ta patience et ta compréhension, merci d'avoir supporté mes horaires chaotiques, mes hauts et mes bas et surtout merci de m'encourager au quotidien dans tout ce que j'entreprends.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est le résultat de deux années de travail, réalisé au laboratoire de lutte biologique de l'UQAM. Ce travail a été dirigé par Éric Lucas et co-dirigé par Daniel Cormier (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement à Saint-Bruno-de-Montarville) et Marcela Rodríguez García (Université de Concepción, au Chili).

Le projet de recherche a été financé par le programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

Ce mémoire est composé de trois chapitres dont deux sous forme d'articles scientifiques. Le premier article (chapitre II) sera soumis pour publication dans *Biological Control* dans les mois qui viennent et le second article (chapitre III) a été soumis pour publication dans *Journal of Pest Science*. Les résultats de cette maîtrise ont été diffusés lors du congrès annuel de la Société d'Entomologie du Québec en 2019 et 2020, et seront diffusés lors du congrès annuel en 2021.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| AVANT-PROPOS | iii |
| LISTE DES FIGURES..... | vi |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES | ix |
| RÉSUMÉ | x |
| ABSTRACT | xi |
| CHAPITRE I INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Système biologique..... | 1 |
| 1.1.1 La pomiculture au Québec | 1 |
| 1.1.2 Les ravageurs de la pomme..... | 4 |
| 1.1.3 La guilde des ennemis naturels aphidiphages | 8 |
| 1.2 La prédation intragilde..... | 12 |
| 1.3 Les insecticides dans les vergers de pommiers..... | 15 |
| 1.3.1 L’impact général des insecticides | 15 |
| 1.3.2 Les insecticides contre le carpocapse de la pomme | 19 |
| 1.3.3 Impact des insecticides à l’étude..... | 20 |
| 1.4 Objectifs et hypothèses | 23 |
| 1.4.1 Objectifs principaux | 23 |
| 1.4.2 Objectifs et hypothèses de recherche | 24 |
| CHAPITRE II IMPACT OF NOVALURON AND CHLORANTRANILIPROLE ON THE APHIDOPHAGOUS GUILD AND THE BIOLOGICAL CONTROL OF GREEN APPLE APHIDS IN APPLE ORCHARDS | 27 |
| 2.1 Résumé/Abstract..... | 27 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.2 | Introduction..... | 30 |
| 2.3 | Material and methods | 32 |
| 2.3.1 | Field experiment..... | 32 |
| 2.3.2 | Insecticides..... | 35 |
| 2.3.3 | Statistical analysis | 35 |
| 2.4 | Results | 36 |
| 2.5 | Discussion..... | 43 |
| 2.6 | Acknowledgement | 47 |
| 2.7 | References cited..... | 47 |
| CHAPITRE III WHEN AN INSECTICIDE REGULATES INTRAGUILD PREDATION AMONG PREDATORS..... | | 52 |
| 3.1 | Résumé/Abstract..... | 52 |
| 3.2 | Introduction..... | 55 |
| 3.3 | Material and methods | 58 |
| 3.3.1 | Insects..... | 58 |
| 3.3.2 | Insecticides..... | 59 |
| 3.3.3 | Field experiments | 59 |
| 3.3.4 | Statistical analysis | 60 |
| 3.4 | Results | 63 |
| 3.4.1 | Larval survival without IG predator..... | 63 |
| 3.4.2 | Larval survival with IG predator..... | 64 |
| 3.4.3 | Aphids growth curves | 67 |
| 3.5 | Discussion..... | 68 |
| 3.6 | Acknowledgements..... | 70 |
| 3.7 | References cited..... | 71 |
| CHAPITRE IV CONCLUSION GÉNÉRALE | | 75 |
| RÉFÉRENCES..... | | 81 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|--|------|
| 1.1 Illustration des stades phénologiques du pommier (Photos par Bernard Drouin, MAPAQ) | 3 |
| 1.2 Schéma du réseau trophique à l'étude | 23 |
| 2.1 Layout of the experimental design. The big squares represent a plot in the orchard with the diamonds as apple trees. The blue rectangles symbolize an experimental block. The colored rectangles in the experimental blocks stand for the trees sprayed with either water (blue), chlorantraniliprole (yellow), or novaluron (orange). The empty diamonds represent the trees where the aphid colonies were established..... | 33 |
| 2.2 RDA biplot scaling type 2, showing the relationship between environmental factors (in blue) and aphidophagous species (in red) A. in 2019 ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.066$), B. in 2020 ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.072$) | 38 |
| 2.3 The abundance of aphidophagous species in each treatment, in 2019 and 2020. Numbers inside de chart represent the number of individuals observed for each species | 40 |
| 2.4 Mean abundance of <i>Pilophorus perplexus</i> observed per aphid colony for each treatment A. in 2019 ($\chi^2 = 8.013$, $df = 2$, $p = 0.018$). B. 2020 ($\chi^2 = 17.089$, $df = 2$, $p = 0.0002$). The small circles represent extreme values and whisker represent standard error | 41 |
| 2.5 Average number of aphids per colony for each treatment after the insecticide applications in 2020 | 43 |
| 3.1 Survival of first instar ladybird larvae in presence of novaluron-treated aphids on apple leaves (dashed lines) and in the presence of water-treated | |

| | |
|---|----|
| plants and aphids (solid lines). a) <i>Coleomegilla maculata</i> (HR=6.712, 95% CI 1.78-25.2, $p = 0.005$). b) <i>Harmonia axyridis</i> (HR=3.505, 95% CI 1.32-9.34, $p = 0.012$) | 63 |
| 3.2 Survival of first instar <i>Coleomegilla maculata</i> larvae (IG preys) with (dashed lines) and without (solid lines) a third instar <i>Harmonia axyridis</i> (IG predator) a) in cages with water-treated aphids and apple leaves (HR=4.278, 95% CI 1.07-17.08, $p = 0.040$). b) in cages with novaluron-treated aphids and apple leaves (HR= 0.356, 95% CI 0.12-1.0, $p = 0.055$) | 65 |
| 3.3 Survival of first instar ladybird larvae in presence of an IG predator in the control (solid lines) and in the insecticide treatment (dashed lines). a) <i>Coleomegilla maculata</i> first instar larvae with a third instar <i>Harmonia axyridis</i> (HR = 0.253, 95% CI 0.082-0.78, $p = 0.016$). b) <i>H. axyridis</i> first instar larvae with a third instar <i>C. maculata</i> (HR=1.700, 95% CI 0.72-4.00, $p = 0.225$)..... | 65 |
| 3.4 Survival of first instar <i>Harmonia axyridis</i> larvae in presence (dashed lines) or absence (solid lines) of a third instar <i>Coleomegilla maculata</i> as an IG predator. a) in cages with water-treated aphids and apple leaves (HR=2.199, 95% CI 0.80-6.0, $p = 0.126$). b) in cages with novaluron-treated aphids and apple leaves (HR = 0.810, 95% CI 0.37-1.8, $p = 0.593$) | 66 |
| 3.5 a) Growth curve of <i>Aphis</i> spp. colonies in each treatment. b) Trends of the growth curves of <i>Aphis</i> spp. colonies in each treatment. A slope above zero means the number of aphids is increasing with time and below zero means the opposite. Dashed lines represent novaluron-treated aphid colonies feeding on novaluron-treated leaves. Solid lines represent water-treated aphid colonies feeding on water-treated leaves | 67 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|--|------|
| 1.1 Liste des insectes et acariens ravageurs primaires de la pomme au Québec (Chouinard <i>et al.</i> , 2021) | 4 |
| 1.2 Liste des principaux prédateurs aphidiphages en vergers au Québec (Chouinard <i>et al.</i> , 2020 ; Dib <i>et al.</i> , 2011)..... | 11 |
| 1.3 Caractéristiques des insecticides recommandés contre le carpocapse de la pomme (IRDA, 2019 ; Morin <i>et al.</i> , 2020)..... | 19 |
| 3.1 Summary of treatments with visual representation | 62 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AAC : Agriculture et Agroalimentaire Canada

ARLA : Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire

DJ : Degrés-jours

EPA : Environmental protection agency

IFP : Integrated fruit production

IGP : Prédation intragilde

IPM : Integrated pest management

IRDA : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

MAPAQ : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

PFI : Production fruitière intégrée

RÉSUMÉ

Le ravageur majeur en pomiculture au Québec est le carpocapse de la pomme *Cydia pomonella* (L.), susceptible d'engendrer la perte de la plus grande partie des récoltes. Pour le contrôler, les pomiculteurs utilisent des insecticides tels le novaluron (benzoylurée à substituant) et le chlorantraniliprole (diamide). L'utilisation de ces insecticides peut affecter le contrôle naturel d'autres ravageurs comme les pucerons verts (*Aphis* spp). Les objectifs de ce projet sont i) d'évaluer l'impact du novaluron et du chlorantraniliprole sur la guildes des aphidiphages, et les conséquences engendrées sur le contrôle naturel des pucerons ; ii) d'évaluer la toxicité du novaluron pour les larves des coccinelles asiatiques et maculées, iii) d'évaluer l'effet combiné du novaluron et de la prédation intragilde entre les deux espèces.

Pour répondre au premier objectif, en 2019 et 2020 des colonies d'*Aphis* spp. ont été établies en verger puis traitées au novaluron, au chlorantraniliprole ou à l'eau. La présence des aphidiphages sur les colonies et l'abondance de pucerons ont été relevées pendant trois semaines. Les résultats montrent que le novaluron et le chlorantraniliprole n'ont pas impacté l'abondance et la diversité des aphidiphages, sauf l'espèce *Pilophorus perplexus* Douglas et Scott qui était absente en présence de novaluron. Le contrôle naturel des pucerons n'a pas été perturbé par les insecticides.

Pour répondre aux deuxième et troisième objectifs, des colonies de pucerons *Aphis* spp. ont été établies puis traitées au novaluron ou à l'eau. Ensuite, des larves de 1^{er} et 3^e stades de coccinelles asiatiques et maculées ont été ajoutées. Les résultats montrent que le novaluron est très toxique pour les larves de 1^{er} stade des deux espèces. Finalement, le novaluron augmente le taux de survie des proies intraguildes en présence de coccinelles asiatiques (prédateur intragilde).

Cette étude montre que le chlorantraniliprole n'impacte pas les aphidiphages et ne perturbe pas le contrôle naturel des pucerons verts. Ces résultats confirment que son utilisation doit être privilégiée en production fruitière intégrée (PFI). Le novaluron a un impact négatif sur *P. perplexus* et les larves de coccinelles. Cependant, il ne perturbe pas le contrôle naturel d'*Aphis* spp. Ces résultats démontrent que le novaluron a un impact intermédiaire, et qu'il devrait faire l'objet d'autres études de terrain.

Mots clés : Novaluron, chlorantraniliprole, contrôle naturel, *Harmonia axyridis* et *Coleomegilla maculata*.

ABSTRACT

The primary pest in Quebec apple orchards is the codling moth *Cydia pomonella* (L.). In extreme cases, it can cause the loss of most of the apple production. In order to suppress this pest, apple growers use insecticides like novaluron and chlorantraniliprole. The objectives of this project are to i) evaluate the impact of novaluron and chlorantraniliprole on the aphidophagous guild, and the consequences they have on the biological control of the green aphids *Aphis* spp.; ii) assess the toxicity of novaluron on first instar larvae of the twelve-spotted and multicolored Asian ladybeetles, and iii) evaluate the combined effect of novaluron and intraguild predation (IGP) on the two ladybeetle species.

For the first objective, standardized green aphid colonies were treated either with novaluron, chlorantraniliprole, or water in 2019 and 2020. For three weeks, the abundance of aphidophagous species on the aphid colonies and the number of aphids were recorded. The results indicate that chlorantraniliprole did not impact the abundance or diversity of aphidophagous species. While most aphidophagous species were not impacted by novaluron, very few capsid bugs *Pilophorus perplexus* were observed on colonies treated with novaluron. Overall, the biological control of the green aphids was not disrupted by either insecticide.

For the second and third objectives, standardized green apple aphid colonies were treated with novaluron or water. Ladybeetles of first and third instar larvae were added to assess larval mortality with the insecticides and with IGP. Results indicate that novaluron was highly toxic for first instar larvae of both twelve-spotted ladybeetles and multicolored Asian ladybeetles. Novaluron increased the survival rate of the multicolored Asian ladybeetle's intraguild preys.

This study shows that chlorantraniliprole does not affect the aphidophagous guild and does not disrupt the biological control of *Aphis* spp. These results confirm that the use of chlorantraniliprole should be prioritized in integrated fruit production (IFP). Novaluron was toxic for *P. perplexus* and ladybeetle larvae. However, it did not disrupt the biological control of green aphids. These results show that novaluron has an intermediary impact and its use is acceptable in IFP.

Keywords: Novaluron, chlorantraniliprole, biological control, *Harmonia axyridis*, *Coleomegilla maculata*.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Système biologique

1.1.1 La pomiculture au Québec

Le Québec est la deuxième province productrice de pommes après l'Ontario (MAPAQ, 2015). En 2018, 6,03 millions de minots de pommes produits au Québec ont été mis sur le marché pour une valeur totale de 59,31 millions de dollars (ISQ, 2020). La production et la vente de pommes représentent donc un intérêt économique important pour la province.

Le pommier domestique *Malus domestica* Borkhausen (Rosales : Rosaceae) est un arbre fruitier de la famille des Rosacées (AAC, 2019). D'origine asiatique, il a été implanté au Canada pour la première fois en 1604 par Samuel de Champlain en Nouvelle-Écosse. Il a été amené au Québec en 1617 par Louis Hébert. Au fil des années, les pommes ont été sélectionnées par l'homme en fonction de leurs caractéristiques, résultant en la création de différents cultivars ou variétés de pommes. Au Québec, les quatre variétés de pommes les plus vendues en 2018 étaient les 'McIntosh', 'Spartan', 'Empire' et 'Cortland' (PPQ, 2019). Les pommes québécoises représentaient 51 % des pommes vendues dans les supermarchés au Québec en 2018. Les producteurs dirigent

les pommes en priorité vers le marché frais parce que la valeur marchande est plus importante que les pommes destinées à la transformation (jus, compote, tarte, etc.). En 2018, le prix moyen payé aux producteurs était de 15,73 \$ le minot pour des pommes fraîches contre 4,03 \$ le minot pour des pommes transformées (PPQ, 2019).

Le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) a lancé en 2017 un programme de modernisation des vergers de pommiers pour améliorer l'efficacité, la rentabilité et la compétitivité du secteur pomicole québécois (MAPAQ, 2017). Un des objectifs du programme de modernisation des vergers est de diminuer la production de pommes McIntosh et ses lignées, pour replanter des variétés plus en demande par les consommateurs. Par exemple, la variété Honeycrisp se vendaient 7,35 \$/kg en 2019, contre 2,55 \$/kg pour les McIntosh (PPQ, 2019). Un autre objectif du programme de modernisation est de remplacer les vergers standards et de replanter des vergers à haute densité, en utilisant des porte-greffes nanisant et des cultivars performants (MAPAQ, 2017). Le porte-greffe est un arbre coupé à la base du tronc et pourvu d'un système racinaire sur lequel on implante un greffon, qui donnera la variété de pommes. Chaque porte-greffe possède ses propres caractéristiques dont la précocité des récoltes, l'augmentation de la résistance au gel, aux parasites et à certaines maladies (OMAFRA, 2018). Les porte-greffes permettent par exemple à une même variété de pommes de s'adapter à des sols différents. Les porte-greffes nanisant limitent la production de bois, pour rediriger l'énergie vers la production fruitière. Les vergers densifiés sont mieux adaptés à la mécanisation des opérations, comme l'utilisation de coupe-haies, balais d'éclaircissage et de désherbage (PPQ, 2019). Les arbres étant plus petits, la récolte des pommes peut se faire presque en totalité sans échelle, ou à l'aide d'une plateforme mobile, ce qui rend la cueillette plus efficace.

Dans le cadre de ce projet de recherche, les expériences se sont déroulées sur des pommiers de cultivar McIntosh greffé sur des M9. La variété McIntosh a été découverte par John McIntosh à Dundas, Ontario, en 1811 (Fraser, 1988). Nous avons choisi cette

variété, car elle est moins susceptible au feu bactérien (OMAFRA, 1998), une maladie causée par la bactérie *Erwinia amylovora* (Burril) (Enterobacteriales : Enterobacteriaceae) causant la mort des arbres. On estime l'arrivée des différents stades phénologiques des pommiers sur l'accumulation de degrés-jours (DJ) sur une base de 5 degrés Celsius (**Fig. 1.1**) (MAPAQ, s. d.). Chez les pommiers McIntosh, l'apparition d'une pointe verte au bout des bourgeons, ou débourrement, est attendu à partir de 65 DJ₅. Le stade du débourrement avancé, lorsque 2-3 feuilles sont déployées, est estimée à 95 DJ₅. L'apparition de boutons en faisceaux, nommés pré-bouton rose, est attendu après 125 DJ₅, suivi du stade du bouton rose (175 DJ₅), et du bouton rose avancé, lorsque les pétales s'allongent (200 DJ₅). La pleine floraison a lieu lorsque les pétales sont complètement étalés (235 DJ₅). Le stade calice, quand 90 % des pétales sont tombés (300 DJ₅) est suivi de la nouaison (350 DJ₅), qui est la phase initiale de la formation de la pomme. Ensuite les fruits se développent jusqu'à maturité et sont récoltés à l'automne.

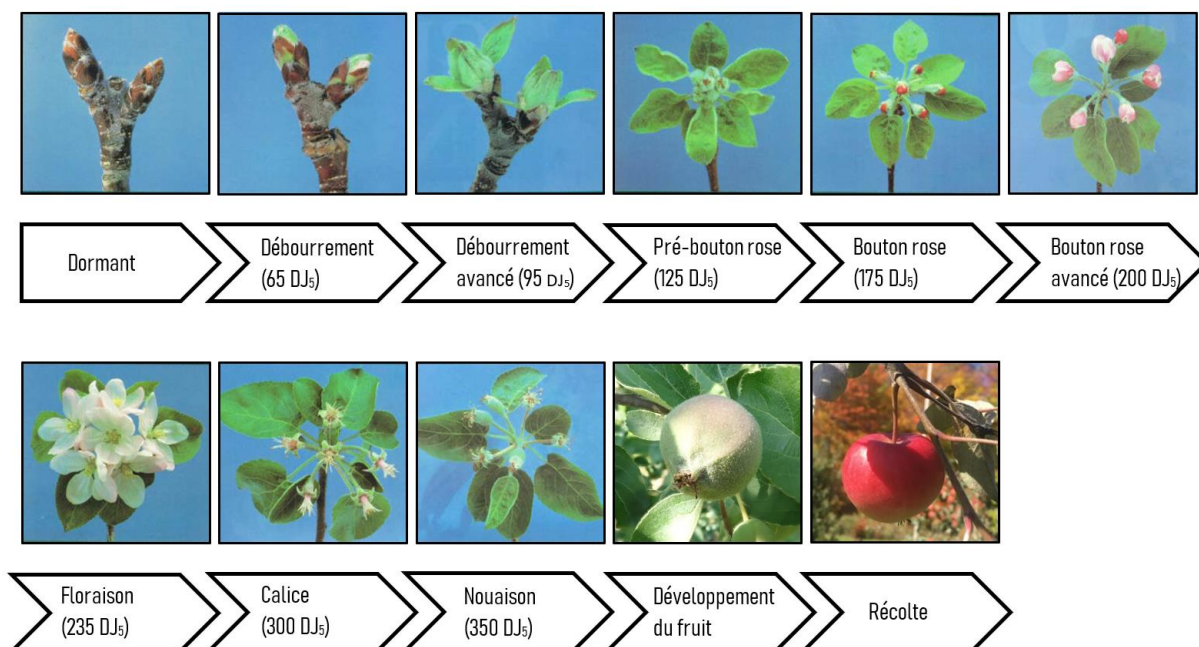


Figure 1.1. Illustration des stades phénologiques du pommier (Photos par Bernard Drouin, MAPAQ, adapté de MAPAQ, s. d.).

1.1.2 Les ravageurs de la pomme

Une soixantaine de ravageurs dont six ravageurs primaires, capables de causer des dommages économiques importants, sont retrouvés dans les vergers au Québec (**Tableau 1.1**). Le ravageur numéro un en pomiculture est le carpocapse de la pomme *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera : Tortricidae). Il cause des dommages aux pommes quand il est au stade larvaire (Morin *et al.*, 2020). Après s'être accouplées, les femelles adultes pondent leurs œufs à la surface des pommes immatures et des feuilles. Après l'éclosion, les chenilles creusent dans la chair des fruits. Ces blessures provoquent la décomposition et la chute des pommes. En cas extrême, le carpocapse peut entraîner la perte de 50 % à 90 % de la récolte (OMAFRA, 2016a). Au Québec, on observe généralement une génération de carpocapse entre la mi-juin et la mi-juillet (Morin *et al.*, 2020). On observe une deuxième génération partielle en août dans les régions plus chaudes du Québec.

Les pomiculteurs ont recours à plusieurs méthodes pour empêcher les dommages causés par les carpocapses. Souvent, des insecticides de synthèse sont utilisés contre les œufs et les larves du ravageur. Plusieurs insecticides sont employés en alternance, selon leur mode d'action, afin de retarder le développement de résistances (Boivin *et al.*, 2001). Cependant, il n'y a pas de consensus sur le seuil d'intervention pour le carpocapse (Morin *et al.*, 2020), il dépend de l'observation des dégâts et de l'historique

Tableau 1.1 Liste des insectes et acariens ravageurs primaires de la pomme au Québec (Chouinard *et al.*, 2021)

| Nom français | Nom scientifique | Ordre | Famille |
|-------------------------------|---|-------------|----------------|
| Carpocapse de la pomme | <i>Cydia pomonella</i> (L.) | Lepidoptera | Tortricidae |
| Charançon de la prune | <i>Conotrachelus nenuphar</i> (Herbst) | Coleoptera | Curculionoidea |
| Mouche de la pomme | <i>Rhagoletis pomonella</i> (Walsh) | Diptera | Tephritidae |
| Punaise terne | <i>Lygus lineolaris</i> (Palisot de Beauvois) | Hemiptera | Miridae |
| Tétranyque rouge (mite rouge) | <i>Panonychus ulmi</i> (Koch) | Acari | Tetranychidae |
| Tordeuse à bandes obliques | <i>Choristoneura rosaceana</i> (Harris) | Lepidoptera | Tortricidae |

des dommages. Souvent, les populations de carpocapses sont suivies avec des pièges à phéromone. Ces pièges attirent et capturent les adultes mâles à l'aide d'une phéromone sexuelle comme la Codlemone (Witzgall *et al.*, 2008). La présence de carpocapses dans les pièges indique une fourchette de date d'intervention en degrés-jours pour pulvériser les insecticides au meilleur moment (Morin *et al.*, 2020 ; OMAFRA, 2016b).

Plusieurs stratégies alternatives sont à l'étude pour diminuer voire remplacer l'utilisation d'insecticides contre le carpocapse au Québec. Une première méthode de lutte est la confusion sexuelle (Benelli *et al.*, 2019 ; Charbonneau *et al.*, 2017 ; Chouinard *et al.*, 2016 ; Witzgall *et al.*, 2008). En 2020, 1862 ha (Cormier, *comm. pers.*) soit 41 % de la surface de production de pommes au Québec utilisent la confusion sexuelle contre le carpocapse (ISQ, 2020). Ce moyen de lutte consiste à accrocher des diffuseurs de la phéromone sexuelle dans les pommiers afin de saturer l'atmosphère de phéromone. Les mâles auront de la difficulté à trouver les femelles et les accouplements seront diminués ou retardés, ce qui se traduira par une diminution de la ponte et une diminution des dégâts causés par les larves. Cette méthode permet de réduire le nombre d'applications d'insecticides voire d'éliminer l'utilisation d'insecticides dans les vergers (Cormier *et al.*, 2019). Le coût des diffuseurs est d'environ 518.75 \$/ha (Agropomme, 2019), mais le programme Prime-Vert du MAPAQ accorde des subventions allant jusqu'à 90 % des coûts afin d'encourager les producteurs à utiliser la confusion sexuelle, et de rendre comparable les coûts d'utilisation de phéromones aux coûts d'utilisation d'insecticides qui se situent entre 80 \$ et 115 \$ par hectares (Agropomme, 2019 ; MAPAQ, 2018). Une autre alternative de lutte prometteuse est l'implémentation de filets à exclusion (Chouinard *et al.*, 2016, 2019). Les filets peuvent recouvrir une parcelle au complet, avec une exclusion incomplète où le filet ne sépare pas l'espace entre le sol et les branches. Sinon, les filets recouvrent des rangées d'arbres, avec une exclusion complète, où la partie inférieure du filet sépare le sol des branches. Les filets diminuent la pression faite par les ravageurs mais aussi diminue la transmission de maladies tout en gardant des fruits de qualité (Chouinard *et al.*, 2019).

La mise en place de filets est coûteuse en termes d'infrastructure à installer, de filets et d'accessoires, mais également en temps de travail. Le coût total annuel par hectare pour l'utilisation de filets monoparcelle est estimé à 10 000 \$/ha (CETAB, 2016). Une troisième alternative aux insecticides est le lâcher d'insectes stériles (Chouinard *et al.*, 2016 ; Horner *et al.*, 2020 ; Nelson *et al.*, 2021 ; Thistlewood et Judd, 2019). Cette méthode de contrôle du carpocapse de la pomme est utilisée depuis une vingtaine d'années en Colombie Britannique (Nelson *et al.*, 2021). L'accouplement des insectes stériles lâchés avec des individus stériles présents dans les vergers entraîne une diminution globale des pontes fertiles et des dégâts sur la pomme. En Colombie-Britannique, les lâchers d'insectes stériles hebdomadaires pendant la saison de croissance des pommes ont causé une diminution de 94 % des populations de carpocapse et une diminution des dommages à seulement 0.2 % des pommes (Nelson *et al.*, 2021). Le coût de lâchers d'insectes stériles revient à environ 129 \$/ha avec le programme de lâcher d'insectes stériles de Okanagan-Kootenay (Cartier, 2015).

Le ravageur le plus répandu et le plus abondant dans les vergers est le puceron vert du pommier *Aphis pomi* DeGeer (Hemiptera : Aphididae) (Blackman et Eastop, 2000). Ce ravageur secondaire est une espèce autoïque, c'est-à-dire que tout son cycle de vie se déroule sur le même hôte. Ce puceron se nourrit de la sève des feuilles et pousses terminales des pommiers (Baker et Turner, 1916 ; Morin et Chouinard, 2020 ; OMAFRA, 2016b). Les jeunes pousses sont affaiblies et leur croissance ralentie, favorisant l'apparition de branches latérales et une diminution de la croissance des bourgeons et de la qualité des pommes (Hamilton *et al.*, 1986 ; Kaakeh *et al.*, 1993 ; OMAFRA, 2016b). De plus, les pucerons produisent du miellat, une substance sucrée qui favorise le développement des champignons causant la fumagine (Chomnunti *et al.*, 2014). Le puceron vert du pommier passe l'hiver au stade d'œuf (Morin et Chouinard, 2020). On commence à le détecter dans les vergers aux alentours du mois de mai, à la période du débourrement avancé. En été, les pucerons se reproduisent asexuellement par parthénogenèse, causant une forte croissance des populations et aux alentours de

14 générations par année (Baker et Turner, 1916 ; Morin et Chouinard, 2020 ; OMAFRA, 2016b). Ils forment des colonies sous les feuilles et aux extrémités des pousses de croissance. Avant l'hiver, les pucerons se reproduisent sexuellement, afin de pondre des œufs qui hiverneront dans le verger. Généralement, les prédateurs et parasitoïdes contrôlent les populations de pucerons donc l'utilisation d'insecticides contre les pucerons est rarement nécessaire. Si les pucerons atteignent un niveau dommageable et que les prédateurs et parasitoïdes aphidiphages sont absents, des aphicides ou des pesticides néonicotinoïdes peuvent être utilisés au Québec (Morin et Chouinard, 2020). En Ontario, des insecticides sont utilisés pour contrôler les adultes lorsqu'on trouve plus de 400 pucerons sur plus de 10 % des jeunes pousses de pommiers inspectées et que les ennemis naturels sont absents (OMAFRA, 2009).

Quatre espèces de pucerons sont observées dans les vergers québécois : le puceron vert du pommier, le puceron de la spirée (*Aphis spiraecola* Patch), le puceron rose (*Dysaphis plantaginea* Passerini) et le puceron lanigère (*Eriosoma lanigerum* Hausmann) (Hemiptera : Aphididae) (Morin et Chouinard, 2020). Les pucerons verts du pommier et les pucerons de la spirée sont indifférenciables sur le terrain et sont communément appelés « pucerons verts » *Aphis* spp. À l'exception du puceron lanigère, ces pucerons sont connus pour entretenir des relations mutualistes avec des fourmis (Miñarro *et al.*, 2010). Les fourmis récoltent le miellat produit par les pucerons, en contrepartie elles les protègent de leurs ennemis naturels. La présence de fourmis cause une diminution de l'abondance des ennemis naturels des pucerons. Les fourmis attaquent davantage les prédateurs actifs que les prédateurs furtifs comme les cécidomyies (Guénard *et al.*, 2018). Par souci de temps, les fourmis n'ont pas été exclues de notre première expérience (chapitre 2). À chaque échantillonnage, le nombre de fourmis a été relevé pour chaque colonie afin de pouvoir comptabiliser l'influence des fourmis sur la structure de la guildes des prédateurs et parasitoïdes des pucerons verts.

1.1.3 La guildes des ennemis naturels aphidiphages

On observe une diversité d'insectes utiles dans les vergers de pommiers, un insecte utile étant un insecte produisant un service écosystémique pour les humains (Getanjaly *et al.*, 2015). Bien que très médiatisés, les pollinisateurs ne sont pas les seuls insectes qui fournissent des services inestimables dans les écosystèmes agricoles (Zhang *et al.*, 2007). Un de ces services écosystémiques est le contrôle naturel des insectes phytophages (Losey et Vaughan, 2006). Il existe spontanément dans les vergers une guildes de prédateurs, parasitoïdes et pathogènes qui attaquent les pucerons (El-Wakeil et Gaafar, 2020 ; Waage *et al.*, 1988), et maintiennent les populations de pucerons sous un certain seuil, limitant les pertes de rendements (Naylor et Ehrlich, 1997). Une guildes est définie par Polis *et al.* (1989) comme étant l'ensemble des espèces exploitant une ressource similaire (nourriture ou espace). Dans le cadre de ce projet de recherche, nous étudions les ennemis naturels qui exploitent les pucerons verts *Aphis* spp. Nous n'étudions pas les pathogènes car ils ne sont pas visibles à l'œil nu et nous n'avons pas observé de parasitisme de parasitoïdes.

On retrouve une multitude de prédateurs aphidiphages (**Tableau 1.2**) et de parasitoïdes, comme les guêpes braconides et chalcides dans les vergers de pommiers au Québec (Chouinard *et al.*, 2020). Les espèces aphidiphages appartiennent à différents groupes fonctionnels. La diversité fonctionnelle de cette guildes est liée à l'efficacité du contrôle naturel des pucerons (Ramirez et Snyder, 2009). Parmi les différents groupes fonctionnels, on retrouve des prédateurs actifs, des prédateurs furtifs, des parasitoïdes et des pathogènes. Les prédateurs actifs regroupent les coccinelles (Coleoptera : Coccinellidae) au stade larvaire et au stade imago, les larves de perce-oreilles (Dermaptera : Chrysopidae), les larves d'hémérobes (Neuroptera : Hemerobiidae), et les punaises prédatrices (Hemiptera : Miridae). Comme leur nom l'indique, les prédateurs actifs cherchent activement leurs proies, qu'ils détectent par contact direct (Chambers, 1988), ou de manière olfactive et visuelle pour les Coccinellidae (Harmon

et al., 1998 ; Obata, 1986). Leurs comportements de chasse se traduisent par une recherche extensive et intensive de proies (Ferran et Dixon, 1993), qui induit généralement une réponse défensive importante chez les pucerons (Dixon, 2009). Au Québec, les prédateurs actifs aphidiphages les plus abondants dans les vergers sont les punaises prédatrices, comme la punaise de la molène *Campylomma verbasci* (Meyer) ou la punaise translucide *Hyaliodes vitripennis* (Say) et les coccinelles (Bouchard *et al.*, 1982 ; Chouinard *et al.*, 2020). Les prédateurs furtifs regroupent les larves de syrphes (Diptera : Syrphidae), de cécidomyies (Diptera : Cecidomyiidae) et de Chamemyiidae (Diptera) (Fréchette *et al.*, 2008). Contrairement aux prédateurs actifs, les prédateurs furtifs vivent à proximité de leurs proies, se déplacent peu, et ne déclenchent pas de réponse défensive chez les pucerons (Fréchette *et al.*, 2008 ; Lucas et Brodeur, 2001). La cécidomyie du puceron *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) (Diptera : Cecidomyiidae) constitue le prédateur du puceron vert le plus présent au Québec (Chouinard *et al.*, 2020 ; Morse et Croft, 1987). Finalement, on retrouve des parasitoïdes, notamment des guêpes parasitoïdes (Hymenoptera) qui pondent leurs œufs à l'intérieur des pucerons. Les femelles détectent leurs hôtes à l'aide de signaux chimiques (Vinson, 1998), et pondent leurs œufs dans les pucerons. Les larves de parasitoïdes se nourrissent des pucerons et causent leur mort (Chouinard *et al.*, 2020).

Dans ce projet, deux espèces de coccinelles sont étudiées plus spécifiquement. La première coccinelle est la coccinelle maculée *Coleomegilla maculata* DeGeer (Coleoptera : Coccinellidae), elle a été choisie parce que c'est une coccinelle indigène au Québec présente dans les vergers. La deuxième est la coccinelle asiatique *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera : Coccinellidae), elle a été choisie parce que c'est l'espèce de coccinelle dominante dans les vergers (Koch, 2003 ; Lucas *et al.*, 2002). Leurs cycles de vie consistent en un stade œuf, quatre stades larvaires, un stade de nymphe avant d'atteindre le stade imago (Hodek et Honek, 1996). Elles sont toutes les deux des généralistes et polyphages, se nourrissant de pucerons, œufs et larves d'autres insectes

(Gagnon *et al.*, 2011 ; Hodek et Honek, 1996), cependant la coccinelle maculée est davantage pollinivore (Lundgren, 2009).

La coccinelle asiatique est une espèce envahissante qui a initialement été introduite aux États-Unis comme agent de lutte biologique (Iablokoff-Khnzorian, 1982). C'est devenu l'une des coccinelles les plus répandues dans l'Est canadien et dans les milieux agricoles (Koch, 2003). Elle a été observée au Québec pour la première fois en 1994 (Coderre *et al.*, 1995). À présent, on la retrouve dans le bassin du Saint-Laurent jusqu'en Abitibi et au nord du Lac Saint-Jean (Lucas *et al.*, 2007). Sa capacité de dispersion, sa voracité et sa fécondité font d'elle une espèce prospère (Labrie *et al.*, 2006 ; Lucas *et al.*, 2007 ; Roy *et al.*, 2006). La coccinelle asiatique est connue pour affecter négativement les coccinelles indigènes et d'autres prédateurs naturels via une prédation intragilde ou une compétition par exploitation.

Tableau 1.2. Liste des principaux prédateurs aphidiphages en vergers au Québec (Chouinard *et al.*, 2020, Düb *et al.*, 2011)

| Ordre | Famille | Nom du groupe | Exemples dans le verger | Efficacité contre les pucerons | Groupe fonctionnel |
|------------|---------------|------------------------------|---|--------------------------------|--------------------|
| Coleoptera | Coccinellidae | Coccinelle à sept points | <i>Coccinella septempunctata</i> L. | ++ | Prédateur actif |
| | | Coccinelle asiatique | <i>Harmonia axyridis</i> (Pallas) | | |
| | | Coccinelle à quatorze points | <i>Propylea quatuordecimpunctata</i> L. | | |
| Dermaptera | Forficulidae | Perce-oreille européen | <i>Forficula auricularia</i> L. | ++ | |
| | | Anthocoridae | <i>Anthocoris</i> sp. et <i>Orius</i> sp. | | |
| Hemiptera | Miridae | Punaises mirides prédatrices | <i>Hyalitodes viripennis</i> (Say) et <i>Campylomma verbasci</i> (Meyer) | Variable | |
| | | Punaises demoiselles | <i>Nabicaula subcoleoptrata</i> (Kirby) | | |
| | | Punaises assassines | <i>Sinea diadema</i> (Fabr.), <i>Zelus socius</i> Uhler et <i>Phymata pennsylvanica</i> Melin | | |
| | | | <i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens) | | |
| Neuroptera | Chrysopidae | Chrysopes | <i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens) | ++ | |
| | | Hémérobidae | <i>Hemerobius humilis</i> L. | | |
| Diptera | Cecidomyiidae | Cécidomyies | <i>Aphidoletes aphidimyza</i> (Rondani) <i>Feltiella</i> sp. | ++++ | Prédateur furtif |
| | | Syrphidae | <i>Bacca</i> , <i>Syrphus</i> , <i>Toxomerus</i> . | | |
| | | Chamaemyiidae | <i>Leucopis annulipes</i> Zetterstedt | | |

1.2 La prédation intraguilde

Une guilda a d'abord été définie par Root (1967) comme étant « un groupe d'espèces qui exploite la même classe de ressource environnementale de la même manière ». La définition a ensuite été modifiée par Polis *et al.* (1989) pour être plus générale et devient « tous les taxons d'une communauté qui utilisent une ressource commune (nourriture ou espace) ». Il y a une dynamique au sein des guildes étant donné que les membres de la guilda interagissent les uns avec les autres et qu'ils ont une répartition spatiale et temporelle différente (Croft, 1990 ; Lucas, 2012). Par exemple, certaines espèces appartenant à une même guilda sont plus actives à certain moment du jour ou des espèces n'exploitent la ressource commune qu'à certaines périodes de leur cycle de vie, se traduisant par une succession d'espèces au cours de la saison (Brown, 1999 ; Pineda et Marcos-García, 2008). Les espèces d'une même guilda peuvent différencier leurs niches spatiales afin de diminuer leurs interactions (Lorenzetti *et al.*, 1997 ; Noriyuki et Osawa, 2016). La répartition peut se dérouler à petite échelle en occupant une partie différente d'une plante, ou elle peut se dérouler à grande échelle avec des espèces occupant différentes cultures dans un paysage (Finke et Snyder, 2008 ; Lorenzetti *et al.*, 1997 ; Lucas, 2012). Hoogendoorn et Heimpel (2004) ont remarqué que lorsque la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée cohabitent dans les champs de coton, la coccinelle maculée change sa distribution afin d'éviter les interactions avec la coccinelle asiatique. L'interaction entre plusieurs espèces d'une même guilda peut être bénéfique, neutre ou négative pour les protagonistes (Croft, 1990 ; Lucas, 2012). Par exemple, Losey et Denno (1998) ont montré qu'il y avait une relation positive (facilitation) entre la coccinelle à sept points *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera : Coccinellidae) et *Harpalus pennsylvanicus* (DeGeer) (Coleoptera : Carabidae), deux prédateurs du puceron vert du pois *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Hemiptera : Aphididae), en ce qui a trait à l'impact sur le puceron. Lorsque *C. septempunctata* attaque *A. pisum*, certains pucerons se laissent tomber de la plante

comme mécanisme de défense, permettant à *H. pennsylvanicus* de consommer *A. pisum* au sol. Les deux prédateurs bénéficient de cette interaction. En revanche, certaines interactions entre des espèces appartenant à la même guilda sont négatives en raison de la compétition ou la prédation (Lucas, 2012 ; Polis et Holt, 1992).

La prédation intraguilda est une interaction écologique complexe qui implique trois acteurs, le prédateur intraguilda (IG predator), la proie intraguilda (IG prey), et la proie extraguilda qui est la ressource partagée par les deux prédateurs (XG prey) (Lucas, 2005 ; Lucas et Maisonhaute, 2019 ; Polis *et al.*, 1989 ; Rosenheim *et al.*, 1995). La prédation intraguilda génère plusieurs scénarios: soit le prédateur intraguilda tue et consomme la proie intraguilda, soit le prédateur intraguilda tue mais ne consomme pas la proie intraguilda, soit le prédateur intraguilda ne tue pas et ne consomme pas la proie intraguilda mais cause des effets sublétaux (Lucas, 2005 ; Pahl *et al.*, 2020). La prédation intraguilda est caractérisée par trois facteurs : la direction, l'intensité et la symétrie de l'interaction (Lucas, 2005, 2012 ; Lucas et Maisonhaute, 2019 ; Pahl *et al.*, 2020). La direction est le sens de l'interaction : si elle est unidirectionnelle les acteurs sont toujours soit le prédateur, soit toujours la proie. Si elle est réciproque (mutuelle), les deux acteurs peuvent être tantôt le prédateur, tantôt la proie dépendamment de leur stade de développement, de la priorité d'arrivée, ou de leur cycle vital. L'intensité de la prédation intraguilda caractérise la fréquence de l'interaction, qui peut être rare, fréquente ou systématique. D'autres facteurs, comme le ratio entre le nombre de prédateurs, de proies intraguildes et de proies extraguildes, la taille des organismes ou la complexité de l'habitat, influencent la fréquence de la prédation intraguilda. La symétrie de la prédation intraguilda fait référence à la dominance ou non d'un des prédateurs sur le second. Si la prédation intraguilda est mutuelle et asymétrique, cela signifie que l'une des espèces agit comme le prédateur intraguilda significativement plus souvent que l'autre espèce. Au contraire, si la prédation est symétrique, les acteurs sont aussi souvent prédateurs que proies intraguildes. La vigueur de la proie intraguilde

par rapport au prédateur intraguilde détermine la vulnérabilité de la proie intraguilde et du risque pour le prédateur.

La prédation intraguilde est fréquente chez les coccinelles (Gagnon *et al.*, 2011). La différence de taille entre les différents stades de développement des coccinelles résulte fréquemment en de la prédation intraguilde (Castro-Guedes *et al.*, 2020 ; Lucas, 2005, 2012). Lorsque les coccinelles participent à de la prédation intraguilde, elles reçoivent plusieurs bénéfices : elles éliminent un prédateur éventuel, elles éliminent un compétiteur, elles consomment une ressource riche en protéines et elles acquièrent des alcaloïdes de leur proie qui leur servent de mécanisme de défense contre d'autres prédateurs (Hautier *et al.*, 2008 ; Lucas, 2012 ; Polis *et al.*, 1989). En contrepartie, plusieurs risques sont associés à la prédation intraguilde : le prédateur peut se blesser ou devenir une proie intraguilde, les prédateurs peuvent être contaminés par des entomopathogènes, et finalement la prédation intraguilde peut augmenter l'exposition au produits phytosanitaires lors de l'ingestion de proies contaminées (Cabrera *et al.*, 2021 ; Provost *et al.*, 2003). Étant donné que la morphologie et le développement des coccinelles sont relativement similaires d'une espèce à l'autre, la prédation intraguilde entre coccinellidés suit certaines règles : i) étant donné que les coccinelles ont une forte voracité et un comportement de recherche de nourriture similaire entre différentes espèces, l'intensité de la prédation intraguilde est élevée; ii) la prédation intraguilde est mutuelle, les œufs et premiers stades larvaires sont les proies intraguildes et les derniers stades larvaires et adultes sont les prédateurs intraguildes; iii) les individus les plus gros s'attaquent aux individus plus petits; iv) les espèces polyphages sont moins affectées que les espèces spécialistes par les alcaloïdes; v) les œufs, nymphes et individus en train de muer sont très susceptibles à la prédation intraguilde; vi) les coccinelles adultes ne sont jamais attaquées avec succès (Lucas, 2012). Les règles énoncées précédemment varient en fonction des espèces. Par exemple, la coccinelle asiatique est particulièrement agressive et vorace. Ainsi, la prédation intraguilde est asymétrique en faveur de la coccinelle asiatique contre des coccinelles indigènes (Castro-Guedes *et al.*,

2020), contribuant au déclin des coccinelles indigènes en Amérique du Nord (Bahlai *et al.*, 2014). Parfois, les espèces en compétition pour une même ressource différencient leurs niches spatiales afin de permettre leur coexistence.

1.3 Les insecticides dans les vergers de pommiers

1.3.1 L'impact général des insecticides

Les pesticides de synthèse apparaissent durant la première guerre mondiale, avec le développement de la chimie organique de synthèse pour créer des armes chimiques (Croft, 1990). Les pesticides organochlorés et organophosphorés sont apparus dans les années 40. Les carbamates sont apparus dans les années 50. Les pyréthriinoïdes et benzoylurées sont apparus dans les années 70. Les néonicotinoïdes sont apparus dans les années 90. Au fil du temps, des insecticides ont été réévalués, et interdits d'utilisation en raison de leur toxicité, et de nouveaux insecticides comme les régulateurs de croissance les ont remplacés (Guedes *et al.*, 2016). Les nouveaux insecticides mis sur le marché sont moins toxiques que les premières générations d'insecticides, mais ils requièrent généralement un nombre d'applications annuelles plus important.

Pour qu'un insecticide soit homologué au Canada, des tests sont réalisés en laboratoires afin d'évaluer, entre autres, l'effet de la molécule active sur la santé humaine et sur l'environnement (ARLA, 2013). Plusieurs paramètres sont pris en compte pour calculer l'effet environnemental du produit : l'infiltration dans les sols, la dangerosité pour les espèces aquatiques, les oiseaux, et certains invertébrés terrestres (Gouvernement du Canada, 2004). Le seul insecte terrestre étudié est l'abeille domestique *Apis mellifera* L. (Hymenoptera : Apidae) (Decourtye *et al.*, 2013). Or, dans les cultures il y a des insectes bénéfiques naturellement présents comme les

pollinisateurs ou les ennemis naturels produisant des services écosystémiques qui valent des milliards de dollars (Losey et Vaughan, 2006). Ce projet porte sur deux insecticides à risques réduits. Un pesticide à risques réduits fait référence à une matière active qui possède au moins une caractéristique avantageuse pour l'environnement ou la santé humaine par rapport aux pesticides déjà présents sur le marché (EPA, 2020 ; Guedes *et al.*, 2016). Afin d'obtenir l'appellation de risques réduits, les produits doivent satisfaire au moins un des six critères suivants : i) faible impact sur la santé humaine, ii) faible toxicité envers les organismes non-cibles, comme les oiseaux, les poissons ou les plantes, iii) faible potentiel de contamination des eaux souterraines, iv) faible taux d'utilisation, v) faible potentiel de résistance et, vi) compatibilité avec les pratiques de lutte intégrée (EPA, 2020).

Le programme québécois de production fruitière intégré (PFI) utilise trois indices de risques pour classer les pesticides : l'indice de risques pour la santé (IRS), l'indice de risques pour l'environnement (IRE) et l'indice de risques pour les espèces bénéfiques du verger (IRB). L'IRS et l'IRE reposent sur l'indice de risques des pesticides du Québec (IRPeQ) qui a été développé par l'institut national de santé publique du Québec (Samuel *et al.*, 2007). L'IRB est calculé à partir d'une base de données maintenue à jour par le Réseau-pommier du Québec. Les trois indices de risques sont additionnés afin de déterminer l'impact total de chaque produit (Chouinard et Bellerose, 2017). Les produits sont ainsi classifiés en trois catégories : i) les produits « verts » avec un impact minimal, dont l'utilisation est privilégiée en PFI, ii) les produits « jaunes » avec un impact intermédiaire, dont l'utilisation est acceptable en PFI, et iii) les produits « rouges » avec un impact important, dont l'utilisation n'est pas acceptable en PFI.

Il y a des grandes lacunes sur l'étude des impacts des insecticides sur les écosystèmes (Guedes *et al.*, 2016). En général, les études sont réalisées en laboratoire et se concentrent majoritairement sur la contamination par contact topique, pour évaluer les taux de mortalité d'une espèce d'intérêt économique sur une période de quelques jours.

Souvent, elles négligent les autres voies d'exposition, l'âge des résidus et les effets sublétaux comme les changements de reproduction, de fertilité, ou de comportement. De plus, les résultats obtenus par des tests menés en laboratoire ne peuvent pas être directement extrapolés sur le terrain (Schmuck *et al.*, 1997) car à l'extérieur les pesticides peuvent être dégradés par des procédés biotiques et abiotiques (Fenner *et al.*, 2013). Par exemple, les résidus d'insecticides peuvent être absorbés et transformés par la plante ou les microorganismes présents dans l'environnement. Des facteurs abiotiques comme la précipitation, l'évaporation ou les UV peuvent être catalyseurs de réactions chimiques (Croft, 1990), altérant les propriétés des molécules actives. De plus, certains résidus de pesticides restent actifs longtemps sur le terrain, et peuvent interagir avec d'autres produits phytosanitaires répandus des semaines ou des mois plus tard (Guedes *et al.*, 2016).

Les insecticides ont des répercussions sur les arthropodes à différentes échelles : ils affectent les individus, les populations et les communautés (Croft, 1990 ; Guedes *et al.*, 2016). Ils affectent les individus en provoquant la mort ou en affectant leur physiologie ou comportement. Lorsque les individus rentrent en contact avec des composés toxiques, des mécanismes de détoxification énergétiquement coûteux se mettent en place. La nature des compromis entre longévité, reproduction et croissance des individus change. De plus, les insecticides peuvent perturber les relations symbiotiques avec le microbiome intestinal des insectes. En plus des microorganismes bénéfiques, les microorganismes entomopathogènes sont également affectés par les insecticides (Duke, 2018). Ces effets sublétaux occasionnent des changements de niches réalisées et de dynamiques intraspécifiques et interspécifiques populationnelles (Cordeiro *et al.*, 2014 ; Croft, 1990 ; Guedes *et al.*, 2016).

Les insecticides ont des effets direct et indirect sur les communautés (Guedes *et al.*, 2016). Les changements de dynamiques populationnelles peuvent engendrer un changement d'habitat, et une altération des relations trophiques. Par exemple, la

présence de certains insecticides peut inverser la dominance compétitive entre deux espèces, ou engendrer un déplacement de niche afin de réduire le coût de la compétition (Finke et Snyder, 2008). Parfois, l'utilisation d'insecticide a des conséquences non désirées, telles que l'apparition de ravageurs résistants, la résurgence soudaine de ravageurs et des épidémies de ravageurs secondaires (Dutcher, 2007 ; Guedes et Cutler, 2014 ; Hardin *et al.*, 1995). Dans une étude réalisée en 2002 aux États-Unis dans l'Utah, Alston (2003) a remarqué qu'il y avait plus de pucerons verts du pommier dans les vergers après l'application de novaluron. Dans une autre étude réalisée dans des vergers de pommiers dans l'état de Washington, Beers *et al.* (2016) ont constaté, après la pulvérisation de novaluron, une diminution de l'abondance de deux aphidiphages : le perce-oreilles prédateur *Forficula auricularia* L. (Dermaptera : Forficulidae) et la guêpe parasitoïde *Aphelinus mali* (Haldeman) (Hymenoptera : Aphelinidae). Cette diminution d'ennemis naturels était accompagnée d'une augmentation du nombre de pucerons lanigères.

L'augmentation du nombre de ravageurs secondaires s'explique de plusieurs manières : le contrôle naturel peut être affaibli si les prédateurs et parasitoïdes meurent, subissent des effets sublétaux, ou évitent les zones qui ont été traitées aux pesticides (Dutcher, 2007 ; Guedes *et al.*, 2016). D'autre part, les insecticides peuvent parfois avoir un effet stimulant pour les ravageurs (Guedes *et al.*, 2016 ; Guedes et Cutler, 2014 ; Vilca Mallqui *et al.*, 2014). Ce phénomène, appelé hormèse, est une réponse biphasique face à un composé toxique (Vilca Mallqui *et al.*, 2014). À dose élevée, ce composé est toxique pour l'individu, alors qu'à dose faible, le composé a un effet stimulant, comme une augmentation de la fécondité. C'est le cas, par exemple, de l'imidaclopride, un insecticide néonicotinoïde (IRDA, 2019). À faibles doses, il est connu pour augmenter le taux de reproduction du puceron du soya (Qu *et al.*, 2015), et du puceron vert du pêcher (Ayyanath *et al.*, 2013). Les insectes phytophages ont évolué pour contourner les défenses chimiques des plantes (Despre *et al.*, 2007). On suspecte que l'évolution de mécanismes contre les métabolites secondaires des plantes leur permet d'adapter

leur métabolisme à diverses substances toxiques, y compris aux insecticides. Cette différence évolutive entre les ravageurs phytophages et les insectes entomophages expliquerait pourquoi les prédateurs sont plus sensibles aux insecticides que les ravageurs secondaires.

1.3.2 Les insecticides contre le carpocapse de la pomme

Dans cette étude, nous travaillons avec deux insecticides à risques réduits utilisés contre le carpocapse de la pomme au Québec afin d'évaluer leur impact sur la guildes des aphidiphages et le contrôle naturel du puceron vert du pommier. Lorsque les populations de carpocapses sont élevées, il est recommandé d'appliquer un ovicide avant la ponte, puis un larvicide juste après l'éclosion des œufs (Morin *et al.*, 2020). Les insecticides recommandés pour l'application avant la ponte sont le novaluron et le méthoxyfénoside, et ceux recommandés après l'éclosion des œufs sont le chlorantraniliprole, le spinétorame, le thiaclopride, l'acétamipride et le méthoxyfénoside (**Tableau 1.3**). Nous avons choisi le novaluron et le

Tableau 1.3 : Caractéristiques des insecticides recommandés contre le carpocapse de la pomme (IRDA, 2019; Morin *et al.*, 2020).

| Produit | Matière active | IRE | IRS | IRB | Effet sur les œufs | | Effet sur les larves | Catégorie et groupe chimique |
|----------|---------------------|-----|-----|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | | | | | Application avant la ponte | Application après la ponte | | |
| Rimon | novaluron | 49 | 8 | 4 | ++++ | + | - | Benzoylurée à substituant – 15 |
| Intrepid | methoxyfénoside | 94 | 20 | 1 | +++ | + | +++ | Diacylhydrazines – 18 |
| Altacor | chlorantraniliprole | 92 | 3 | 2 | + | + | ++++ | Diamides – 28 |
| Calypso | thiaclopride | 1 | 221 | 3 | + | +++ | ++ | Néonicotinoïdes – 4A |
| Assail | acétamipride | 39 | 30 | 4 | + | +++ | ++ | Néonicotinoïdes – 4A |
| Delegate | spinétorame | 121 | 19 | 3 | - | - | ++++ | Spinosynes – 5 |
| Imidan | phosmet | 144 | 390 | 4 | - | - | +++ | Organophosphorés – 1B |

| | | | |
|--|---|-------------------------|------------------------------|
| | impact minimal avec une utilisation privilégiée en PFI | – = aucune efficacité | +++ = bonne efficacité |
| | impact intermédiaire avec une utilisation acceptable en PFI | + = faible efficacité | ++++ = excellente efficacité |
| | | ++ = efficacité moyenne | |

chlorantraniliprole pour notre étude parce qu'ils sont fréquemment utilisés en alternance en verger et pour poursuivre l'étude de l'impact du novaluron sur la prédation intragilde entre la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée réalisée en laboratoire par Paula Cabrera lors de son doctorat au laboratoire de lutte biologique à l'UQAM.

1.3.3 Impact des insecticides à l'étude

Le premier insecticide étudié est le novaluron (Rimon® 10 EC) et le second insecticide est le chlorantraniliprole (Altacor® 35 WG). Le novaluron, est un insecticide de la famille des urées benzoylphényl (groupe 15) (IRAC, 2018 ; Ishaaya *et al.*, 2002, 2003). Il a été homologué au Canada en 2007 (Santé Canada, 2007). C'est un régulateur de croissance qui inhibe la synthèse de la chitine affectant le gène CHS1 (Chitine synthase 1 gène), ce qui empêche la mue chez les arthropodes (Ishaaya *et al.*, 2002). Il est classé comme « impact intermédiaire, utilisation acceptable en PFI », avec un IRS de 8, un IRE de 49 et un IRB de 4 (IRDA, 2019). Le novaluron cible principalement les larves de lépidoptères, les aleurodes, et les mineuses. Il a une action transcuticulaire, c'est-à-dire qu'il est absorbé par la cuticule des feuilles (Morin *et al.*, 2020). Il est également utilisé dans de nombreuses cultures à travers le monde, pour combattre d'autres ravageurs tels que le doryphore de la pomme de terre, la pyrale du maïs, la tordeuse orientale du pêcher, le charançon du poivron, et la tordeuse des canneberges (ADAMA, 2018). Le chlorantraniliprole est un insecticide de la famille des diamides (groupe 28) (IRAC, 2018). Il a été homologué en 2011 au Canada (Santé Canada, 2011). C'est un modulateur des récepteurs de ryanodine (Cordova *et al.*, 2006). Il provoque une paralysie musculaire suivie de la mort des insectes. Il est classé comme insecticide avec un « impact minimal, utilisation privilégiée en PFI », avec un IRS de 3, un IRE de 92 et un IRB de 2 (IRDA, 2019). Il a une action translaminaire, c'est-à-dire qu'il traverse les couches des feuilles (Morin *et al.*, 2020). Il est homologué contre des ravageurs de différentes cultures à travers le monde. Par exemple, il est utilisé contre la tordeuse des

canneberges, l'hoplocampe des pommes, la tordeuse orientale du pêcher, la mouche de la pomme et la tordeuse de la vigne (FMC Corporation, 2017).

Plusieurs chercheurs ont déjà étudié l'impact du novaluron et du chlorantraniliprole sur des insectes bénéfiques. Des études ont montré que le chlorantraniliprole n'est pas toxique pour certaines espèces de chrysopes *Chrysoperla externa* Steinmann ou *Chrysoperla rufilabris* (Burmeister) (Joao Zotti *et al.*, 2013 ; Roubos *et al.*, 2014), et très toxique pour les larves et adultes d'autres espèces de chrysopes telles que *Chrysoperla carnea* (Stephens) et *Chrysoperla johnsoni* Henry, Wells and Pupedis (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Mills *et al.*, 2016). Il n'a pas d'effets remarquables sur les guêpes parasitoïdes (Brugger *et al.*, 2010 ; Cormier *et al.*, 2017 ; Dinter *et al.*, 2008). Dans une étude menée par Barbosa *et al.* (2017), la coccinelle convergente *Hippodamia convergens* Guérin-Ménéville (Coleoptera : Coccinellidae) est négativement impactée par le chlorantraniliprole par contact topique, résiduel et consommation de proies contaminées. Cependant, d'après une autre étude, *H. convergens* ne semble pas affecté par les résidus vieillis de chlorantraniliprole (Roubos *et al.*, 2014). Les coccinelles semblent sensibles aux différentes voies d'exposition. Le novaluron est très toxique pour les chrysopes (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Joao Zotti *et al.*, 2013), et les guêpes parasitoïdes (Mills *et al.*, 2016). Il a des effets sublétaux envers les punaises prédatrices (Cutler *et al.*, 2006 ; Mills *et al.*, 2016), les parasitoïdes (Cormier *et al.*, 2017). Il est très toxique envers certaines espèces de coccinelles, telles que la coccinelle asiatique (Cabrera *et al.*, 2017). Le novaluron est également connu pour être modérément toxique pour les abeilles domestiques, les acariens phytoséiides, les cécidomyies, et les syrphes (Cutler *et al.*, 2006 ; Evans, 2004 ; IRDA, 2019).

Dans le chapitre trois, nous avons évalué la toxicité du novaluron sur des larves de coccinelles maculées et coccinelles asiatiques. Ce volet expérimental s'appuie sur les publications de Paula Cabrera. Elle a travaillé sur l'effet létal (2014, 2017), et les effets sublétaux (2018) du novaluron et chlorantraniliprole sur les deux espèces de

coccinelles. Dans son premier article, Cabrera (2014) a évalué en laboratoire la mortalité des larves de premier stade via deux voies d'exposition : l'ingestion de proies contaminées et l'exposition à des résidus frais. Les deux espèces de coccinelles se sont révélées sensibles aux résidus frais de novaluron. La contamination par ingestion de proies contaminées a montré des résultats différents. La coccinelle maculée n'est pas sensible au novaluron par ingestion, alors que 96,7 % des larves de coccinelles asiatiques étaient mortes six jours après l'ingestion de proies contaminées. Dans son deuxième article, Cabrera (2017) a évalué en laboratoire la mortalité des œufs et larves des coccinelles. Les résultats ont montré que l'exposition au novaluron par contact topique n'affecte pas les œufs des deux espèces. Les larves de premier stade de coccinelles maculées ne sont pas sensibles au novaluron par contact topique, en revanche 91 % des larves de premier stade de coccinelles asiatiques étaient mortes six jours après l'exposition. Cabrera (2018) a étudié les effets de la consommation de proies contaminées au novaluron sur des coccinelles adultes. Elle a constaté que chez la coccinelle maculée, la fertilité, la fécondité et le taux d'éclosion des œufs n'étaient pas affectés par l'ingestion de proies contaminées. En revanche, la consommation de proies contaminées chez la coccinelle asiatique s'accompagnait d'une baisse de 29 % de la fécondité, d'une réduction de 43 % de l'éclosion des œufs et d'une réduction de 78,7 % de la fertilité. (Cabrera *et al.*, 2021) ont déterminé que le novaluron réduit la valeur adaptative de la prédation intraguilde chez la coccinelle asiatique mais pas chez la coccinelle maculée. La consommation d'un prédateur intraguilde contaminé au novaluron n'a pas causé de mortalité pour les larves de coccinelles maculées. Les larves de coccinelles asiatiques ayant consommé des proies intraguildes contaminées au novaluron ont montré un taux de mortalité élevé. En revanche, la consommation de de proies intraguildes contaminées ayant mué du premier au deuxième stade n'a pas causé de mortalité chez la coccinelle asiatique. Ces résultats montrent que les coccinelles maculées ont neutralisé le novaluron après avoir mué du premier au deuxième stade larvaire. Globalement, les travaux de Paula Cabrera montrent que la coccinelle asiatique est plus sensible au novaluron que la coccinelle maculée en laboratoire.

1.4 Objectifs et hypothèses

1.4.1 Objectifs principaux

L'objectif du projet est d'étudier en verger l'effet de deux insecticides à risques réduits sur la guildes des prédateurs aphidiphages. Deux expériences à différentes échelles ont été réalisées : une à grande échelle en verger afin de voir si le novaluron et le chlorantraniliprole affectent l'abondance et la diversité des aphidiphages et s'ils perturbent le contrôle naturel du puceron vert du pommier; une à petite échelle (semi-terrain) afin de voir comment le novaluron impacte deux espèces de coccinelles et la prédation intraguilde entre celles-ci (**Fig. 1.2**).

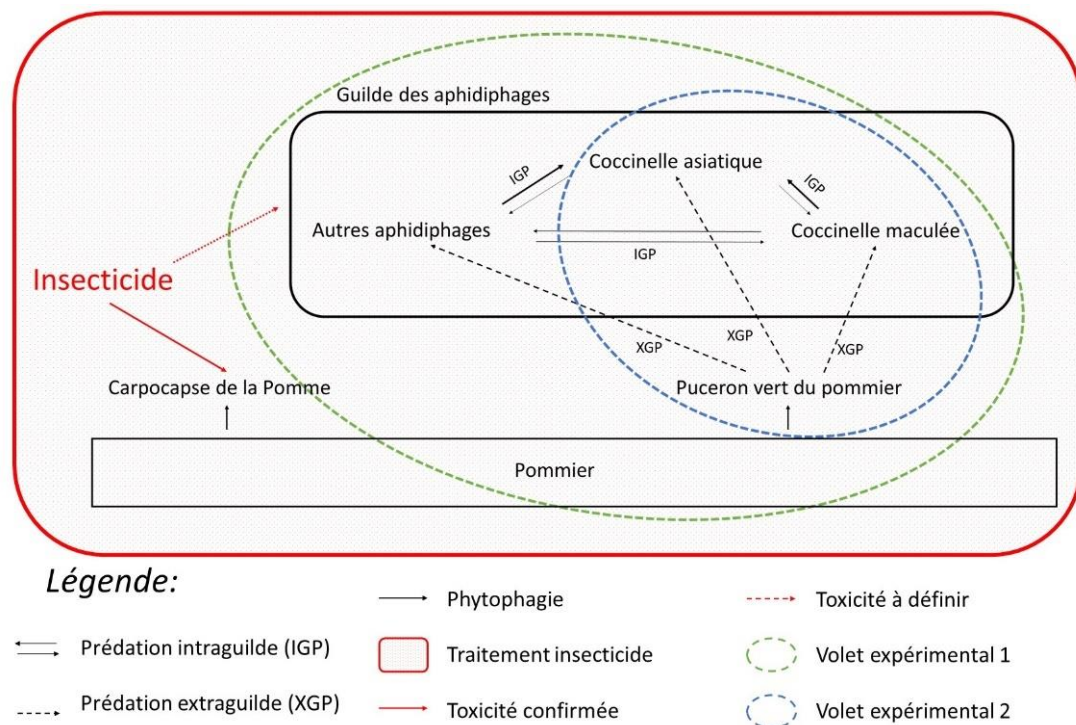


Figure 1.2. Schéma du réseau trophique à l'étude

1.4.2 Objectifs et hypothèses de recherche

Objectif spécifique 1 : Étudier l'effet des deux insecticides sur la structure de la guildes des prédateurs.

Hypothèse 1.1 : La présence de novaluron et de chlorantraniliprole résultera en une perte d'abondance et de diversité de la guildes des prédateurs aphidiphages.

Justification : Le novaluron et le chlorantraniliprole sont létaux ou ont des effets sublétaux sur plusieurs prédateurs naturels et parasitoïdes aphidiphages (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Cabrera *et al.*, 2014, 2017, 2018 ; Cutler *et al.*, 2006 ; Joao Zotti *et al.*, 2013 ; Mills *et al.*, 2016 ; Roubos *et al.*, 2014).

Hypothèse 1.2 : Le novaluron résultera en une perte d'abondance et de diversité de la guildes des prédateurs aphidiphages plus importante que le chlorantraniliprole.

Justification : Les études qui comparent la toxicité du novaluron et du chlorantraniliprole montrent que le chlorantraniliprole est moins toxique et plus sélectif (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Beers *et al.*, 2016b, 2016a ; Cormier *et al.*, 2017 ; Joao Zotti *et al.*, 2013 ; Mills *et al.*, 2016 ; Roubos *et al.*, 2014). L'IRB du Rimón (4) est plus élevé que celui de l'Altacor (2) (IRDA, 2019). Ainsi, on s'attend à observer plus d'effets négatifs sur les insectes bénéfiques avec le novaluron qu'avec le chlorantraniliprole.

Objectif spécifique 2 : Étudier l'influence des deux insecticides sur le contrôle naturel du puceron vert du pommier.

Hypothèse 2.1 : La présence de novaluron et de chlorantraniliprole résultera en un contrôle naturel des pucerons verts moins efficace, se traduisant par une disparition de colonie plus lente.

Justification : Plus une guildes est diversifiée, plus le contrôle naturel est efficace (Croft, 1990 ; Ramirez et Snyder, 2009). Le novaluron et le chlorantraniliprole ont des effets létaux et sublétaux sur plusieurs prédateurs naturels et parasitoïdes (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Beers *et al.*, 2016b ; Cabrera *et al.*, 2014, 2017, 2018 ; Cutler *et al.*, 2006 ; Joao Zotti *et al.*, 2013 ; Roubos *et al.*, 2014). Les services écosystémiques fournis par les prédateurs naturels sont affectés négativement par l'emploi des insecticides en agriculture (Naylor et Ehrlich, 1997). Avec une guildes aphidiphage moins diversifiée, on s'attend à avoir un contrôle naturel moins efficace.

Hypothèse 2.2 : La présence de chlorantraniliprole résultera en un contrôle naturel des pucerons verts moins lent qu'en présence de novaluron.

Justification : Beers *et al.* (2016) ont trouvé que le chlorantraniliprole ne perturbe pas le contrôle naturel de plusieurs ravageurs secondaires. Les études qui comparent la toxicité du novaluron et du chlorantraniliprole déduisent que le chlorantraniliprole est moins toxique et plus sélectif (Amarasekare et Shearer, 2013 ; Beers *et al.*, 2016b ; Cormier *et al.*, 2017 ; Joao Zotti *et al.*, 2013 ; Mills *et al.*, 2016 ; Roubos *et al.*, 2014). Plus une guildes est diversifiée, plus le contrôle naturel est efficace (Croft, 1990 ; Ramirez et Snyder, 2009).

Objectif spécifique 3 : Étudier les effets de résidus de novaluron et de proies contaminées sur les coccinelles maculées et les coccinelles asiatiques.

Hypothèse 3: En présence de novaluron, les larves de la coccinelle maculée survivront davantage que celles de la coccinelle asiatique.

Justification : En laboratoire, le novaluron est très toxique pour les larves de coccinelles asiatiques par contact topique et proies contaminées (Cabrera *et al.*, 2014, 2017, 2018). Le novaluron n'est pas toxique pour les larves de coccinelles maculées par contact

topique et proies contaminées (Cabrera *et al.*, 2014, 2017). Contrairement à la coccinelle asiatique, la coccinelle maculée est capable de neutraliser le novaluron.

Objectif spécifique 4 : Étudier l'impact du novaluron sur la prédation intragilde entre la coccinelle maculée et la coccinelle asiatique.

Hypothèse 4.1 : La survie des proies intragildes sera supérieure en présence de novaluron que dans le témoin quand la coccinelle asiatique est le prédateur intragilde.

Hypothèse 4.2 : La survie des proies intragildes sera la même en présence de novaluron et dans le témoin quand la coccinelle maculée est le prédateur intragilde.

Justification : En temps normal, la prédation intragilde est asymétrique en faveur de la coccinelle asiatique (Castro-Guedes *et al.*, 2020). La coccinelle maculée est moins affectée par le novaluron que la coccinelle asiatique (Cabrera *et al.*, 2014, 2017, 2018, 2021). La prédation intragilde augmente l'exposition du prédateur intragilde aux insecticides (Provost *et al.*, 2003). En laboratoire, la coccinelle asiatique est négativement impactée par la consommation de proies intragilde et extragilde contaminées au novaluron, contrairement à la coccinelle maculée qui n'est pas impactée par la consommation de proies intragilde ou extragilde contaminée au novaluron (Cabrera *et al.*, 2021).

CHAPITRE II

IMPACT OF NOVALURON AND CHLORANTRANILIPROLE ON THE APHIDOPHAGOUS GUILD AND THE BIOLOGICAL CONTROL OF GREEN APPLE APHIDS IN APPLE ORCHARDS

Alice De Donder, Daniel Cormier, Marcela Rodríguez García, Éric Lucas

2.1 Résumé/Abstract

Le novaluron et le chlorantraniliprole sont deux insecticides à risques réduits utilisés contre le carpocapse de la pomme *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera : Tortricidae), le principal ravageur en pomiculture en Amérique de Nord. Les insecticides peuvent avoir un effet létal ou des effets sublétaux sur des espèces non-visées comme les ennemis naturels, ce qui peut perturber des processus biologiques importants comme le contrôle naturel de ravageurs. Plusieurs études ont montré que l'utilisation d'insecticides impacte négativement la diversité et l'abondance d'ennemis naturels dans un système, entraînant une résurgence de ravageurs secondaires. Cette étude est le résultat de deux années de terrain qui visaient à déterminer l'impact du novaluron et du chlorantraniliprole sur la guildes des aphidiphages et leur répercussion sur le contrôle

naturel de ravageurs secondaires fréquents dans les vergers, les pucerons verts *Aphis* spp. Les résultats indiquent que le chlorantraniliprole n'impacte ni l'abondance ni la diversité de la guildes des aphidiphages. Une diminution importante du nombre de punaises prédatrices *Pilophorus perplexus* Douglas et Scott a été observée dans les traitements au novaluron comparé aux traitements témoin et au chlorantraniliprole. Aucun des deux insecticides n'a impacté le contrôle naturel des pucerons verts.

Mots clés : Insecticide à risques réduits, ennemis naturels, prédateurs aphidiphages, production fruitière intégrée, *Pilophorus perplexus*.

In North America, the primary pest in apple orchards is the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). Two reduced-risk insecticides recommended in integrated pest management to suppress this pest are novaluron and chlorantraniliprole. The lethal or sublethal effects of an insecticide on natural enemies can disrupt important processes like the biological control of other pests. Several studies have shown that the use of pesticides can negatively impact the diversity or abundance of natural enemies which may result in secondary pest outbreaks. This study is a two-year field experiment conducted to determine the impact of novaluron and chlorantraniliprole on the aphidophagous guild and the repercussions on the biological control on the most common secondary pest in apple orchards, green aphids *Aphis* spp. (Hemiptera: Aphididae). Results indicate that the use of chlorantraniliprole did not impact the abundance or diversity of the aphidophagous guild. While most aphidophagous species were not impacted by novaluron, a significant decrease of one of the more abundant predators, the predatory mirid bugs *Pilophorus perplexus* Douglas & Scott (Hemiptera: Miridae) was observed after its use. The biological control of green aphids was not impacted by either insecticide.

Keywords: Reduced-risks insecticide, natural enemies, aphidophagous predators, IFP, *Pilophorus perplexus*.

2.2 Introduction

Insecticides are widely used to control pests in crops. First generations are being replaced by more selective and less toxic insecticides (Croft, 1990; Guedes *et al.*, 2016). Many ecotoxicological studies focus on the toxicity of newer insecticides on non-target organisms, including beneficial insects such as pollinators or natural enemies that are responsible for ecosystem services worth billions of dollars (Liere *et al.*, 2017). Many studies are done under laboratory conditions to determine the toxicity or the lethal dose of insecticides toward non-target organisms (Guedes *et al.*, 2016). These studies are necessary, but they often focus on only one or a few species. In the field, communities of organisms have complex relationships and are responsible for multiple ecosystem processes (Liere *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2007). When insecticides are toxic for natural enemies, they can affect the structure and functions of its populations and communities, which can cause a trophic cascade effect leading to secondary pest outbreaks and increased herbivory (Croft, 1990; Guedes *et al.*, 2016). Secondary pests that were earlier suppressed below economic injury levels by natural enemies may become problematic, and previously unnecessary insecticide treatments may be needed to suppress them.

The codling moth *Cydia pomonella* (L.) is the primary pest in apple orchards in North America (Pajac *et al.*, 2011). In eastern Canada, it has one, and a partial second generation per year (Morin *et al.*, 2020). Beside mating disruption, insecticides are commonly used to suppress the first generation, and the second if needed. Generally, two insecticidal treatments are used to control the first generation of the codling moth in Quebec, Canada. One strategy against the codling moth is to spray an ovicidal treatment before females lay their eggs and spray a larvicidal insecticide just after the eggs hatch (Morin *et al.*, 2020). Novaluron and chlorantraniliprole are two insecticides recommended in integrated pest management (IPM) against the codling moth. Both are

novel insecticides meant to replace broad-spectrum insecticides (Dinter *et al.* 2008; Ishaaya *et al.*, 2003). Novaluron, used for its ovicidal properties on the codling moth, belongs to the benzoylphenyl urea family, which inhibits the synthesis of chitin causing endocuticular abortion. Chlorantraniliprole, used for its larvicidal properties on the codling moth, belongs to the anthranilic diamide family, which interferes with the ryanodine receptors causing the paralysis of muscle cells and death. Both novaluron and chlorantraniliprole are labeled as reduced-risk insecticides. The United States Environmental Protection Agency defines a reduced-risk pesticide as a one that poses less risk to human health or the environment than existing conventional alternatives (EPA, 2020). Some of the criteria for the reduced-risk status are a lower toxicity to non-target organisms and/or a compatibility with IPM. Historically, first-generation insecticides used against the codling moth, like DDT, have caused secondary pest outbreaks (Collyer, 1976). DDT was harmful to phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) which caused secondary pest outbreaks of the European red mite, *Panonychus ulmi* (Koch) (Acari: Tetranychidae). Green apple aphids *Aphis* spp. are one of the most abundant secondary pests in canadian apple orchards (Stoeckli *et al.*, 2008). Generally, they are not problematic as the aphid populations are controlled by natural enemies, or aphidophagous species (Morin & Chouinard, 2020). But, the use of insecticidal treatments is recommended to control green apple aphid populations when the number of aphids is above the economic threshold and natural enemies are scarce or absent (OMAFRA, 2009). Studies have shown that chlorantraniliprole and novaluron can be toxic towards aphidophagous species (Cabrera *et al.*, 2017; Cutler *et al.*, 2006; Döker *et al.*, 2015; Lefebvre *et al.*, 2012; Mills *et al.*, 2016; Roubos *et al.*, 2014). For beneficial insects, chlorantraniliprole generally seems less toxic than novaluron (Cabrera *et al.*, 2017). The goal of this study is to determine under field condition the impact of novaluron and chlorantraniliprole on the abundance of the aphidophagous guild and the efficacy of the biological control of the green apple aphids. We hypothesize that the abundance and diversity of the aphidophagous guild will be lower in the novaluron and chlorantraniliprole than in the control treatment. Novaluron will

be more harmful towards the aphidophagous guild since it is less selective than chlorantraniliprole. We also hypothesize that novaluron and chlorantraniliprole will disrupt the biological control of *Aphis* spp., and that it will take more time for aphid colonies to disappear in the novaluron treatment than in the chlorantraniliprole treatment as more aphidophagous predators will be harmed.

2.3 Material and methods

2.3.1 Field experiment

The work took place during the summers of 2019 and 2020 in the experimental apple orchard of the Research and Development Institute for the Agri-environment located at Saint-Bruno-de-Montarville in the province of Quebec, Canada (45°32'29.5"N and 73°20'24.4"W). The research plots consist of dwarf McIntosh apple trees grafted on M9 rootstock that were planted in 2005. Each plot contains eight rows of 30 apple trees spaced 1.25 m apart and with 3.25 m between rows. Trees have a maximum height of 3.25 m and a width of 1.90 m. The trees were not irrigated during the years 2019 and 2020. No insecticide treatments were done during the growing season of the experiments.

The experimental design had five blocks, each block consisting of three adjacent rows of 15 consecutive trees (**Fig. 2.1**). On each row, we selected six consecutive trees in a randomized disposition to be treated with either, novaluron, chlorantraniliprole, or water, the latter as a control. The rows of treated trees are arranged in a staggered disposition to prevent the drifting of insecticides between rows. On the two central trees of treated trees, three vegetative shoots were selected to establish the *Aphis* spp. Colonies of over 120 individuals. The shoots were chosen at shoulder height to

facilitate the sampling, and all insects were removed from the shoots before adding green aphids of mixed stages. On the day of the insecticide spray, every aphid colony was standardized manually to 100-120 individuals. To reduce insecticide drift, apple trees were sprayed with a custom-made tangential Weber® sprayer.

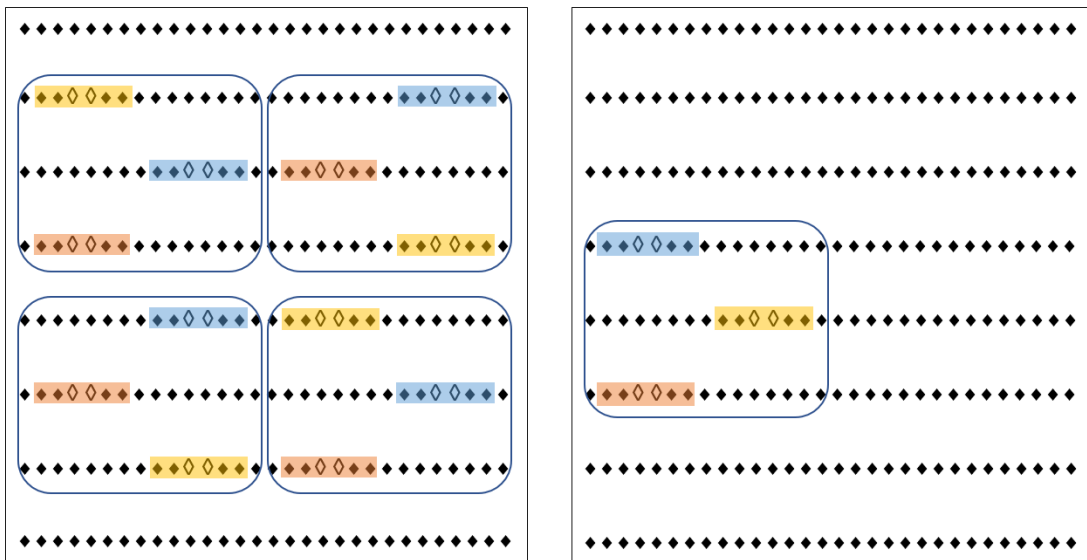


Figure 2.1. Layout of the experimental design. The big squares represent a plot in the orchard with the diamonds as apple trees. The blue rectangles symbolize an experimental block. The colored rectangles stand for the trees sprayed with either water (blue), chlorantraniliprole (yellow), or novaluron (orange). The empty diamonds represent the trees where the aphid colonies were established.

The sampling began 24h after spray and continued every other day for three consecutive weeks. At each sampling, the number of aphids was counted in each colony, and for a period of five minutes, every aphidophagous predator observed within a 50 cm radius of each colony was recorded. Predators, parasitoids, and pathogens control aphid populations, but pathogens were excluded from this study as they are not visible to the naked eyes. No aphid mummies were observed, so no parasitoids were identified. Most aphidophagous species were identified visually, either in the field, or using

pictures taken during the observation (CRAAQ, 2000). Some predatory mirid bugs were taken and sent, on the last sampling day to the Phytoprotection expertise and diagnostic laboratory of the Quebec Ministry of Agriculture, Fisheries, and Food to be identified. Specimens that could not be clearly identified from pictures, such as Dolichopidae and predatory mites, were given the most accurate taxonomic rank or clade possible. The predatory mites were observed eating aphids, so they were considered aphid predators. At each sampling, several factors were recorded for every colony to determine in a multivariate analysis if they influence the occurrence or abundance of aphidophagous species. The factors recorded were as followed: *Aphids* for the number of aphids in the sampled colonies, *Colonies* for an estimation of the abundance of other aphids within a one-meter radius from the sampled colonies. The presence of a high abundance of aphids close to the sampled colonies could potentially attract more aphidophagous species; *Day* for the number of days since the first sampling. It is known that aphidophagous species may feed on aphids at a specific life stage, so there is a succession of different species feeding on aphids during the summer, and different species may be observed at different times of the sampling period (Chouinard *et al.*, 2020); *Novaluron* and *Chlorantraniliprole* for the colonies sprayed with novaluron and chlorantraniliprole respectively, to see if the insecticide influences the presence and abundance of the aphid predators; *Ants* for the number of ants guarding the colonies. Ants and aphids have a mutualistic relationship where ants harvest honeydew from aphids and they protect the aphids against predators in return. Ants are known to be more aggressive toward active predators than passive predators (Miñarro *et al.*, 2010), so the abundance of ants can influence the aphidophagous guild; *Rain* as a factor to record sampling done under the rain as the weather can influence foraging behaviors of insects (Antiqueira *et al.*, 2020); *Block#* for the number of the experimental block, *Borders* for colonies close to the border of the field, *Height* for the distance in cm between the tip of the shoot and the ground, *Width* for the distance between the tip of the shoot and the tree trunk, and *Exposition* for the direction of the branch, to see whether the position of the colonies in the orchard or on the tree can

influence the presence and abundance of aphidophagous species. The same trees, that were sprayed with insecticides or water in 2019, were also sprayed in 2020.

2.3.2 Insecticides

We used the insecticides at the field rates recommended for apple farmers in Quebec. The concentration of novaluron insecticide (Rimon[®] 10 EC) and chlorantraniliprole (Altacor^{mc}) were 0.93 L of Rimon for 1000 L of water (100 g a.i./ha), and 145 g of Altacor per hectare (50.75 g a.i./ha). The tangential Weber[®] sprayer was used with a spray volume of 920 L/ha.

2.3.3 Statistical analysis

The statistical analyses were performed using R statistical software version 3.6.1 (R Development Core Team, 2018). To highlight the issues with the aphid colonies, the abundance of aphids at the first sampling date in every colony for each treatment was compared by doing a Kruskal-Wallis test followed by a Mann Whitney/Wilcoxon test.

A redundancy analysis (RDA) with a type two scaling was done to determine the environmental factors explaining the occurrence of the aphidophagous species. A Hellinger transformation was performed on the data of species composition, and standardization of the environmental factors with the function *decostand()* (Legendre & Gallagher, 2001). The adjusted R squared was calculated for each RDA. A permutation test with 1000 permutations was done to test the significance of the model and the axis of the RDA. The environmental factors considered were the following: *Aphids*, *Colonies*, *Day*, *Novaluron*, *Chlorantraniliprole*, *Block#*, *Ants*, *Rain*, *Borders*, *Height*, *Width*, and *Exposition*.

The abundance, species richness and Simpson diversity index were calculated for every colony and the mean abundance, the mean species richness and mean diversity index were compared for each treatment with a Kruskal-Wallis test. A contingency table was made to compare the proportion of each aphidophagous species in every treatment with a Pearson's chi-squared test, followed by a chi-squared post hoc test with a Bonferroni correction.

A comparison of the aphid growth curves with each environmental factor was done. Equations of the growth curves were produced with each environmental factor and the Bayesian information criterion (BIC) was calculated for each equation to determine if the curves were linear, quadratic, or polynomial. The best models were selected by choosing the equation with a lower BIC than equations without environmental factors (Vrieze, 2012). Using the package *lmerTest*, a type III ANOVA was performed for each equation with a lower BIC to determine the environmental factors influencing significantly the intercept or the shape of the aphid growth curves.

2.4 Results

In 2019, the spring was late which caused a slower vegetation growth. The experiment took place in July as the phenology of the apple trees and the codling moth was delayed. The insecticides and the control were first sprayed on the 10th of July 2019. Less than 48 hours after the insecticide application, a summer storm occurred with rainfalls of 55 mm. It is recommended to reapply novaluron and chlorantraniliprole after rainfalls superior to 50,8 mm as the insecticides are considered partially washed off (Wise *et al.*, 2017), therefore the insecticides and the control were resprayed a second time on the 18th of July 2019. As the experiment was repeated, some aphid colonies had partially or totally disappeared. Less than 24 hours after the second insecticide application, the insecticides were washed off a second time with rainfalls of 51 mm. After the second

insecticide application during the first sampling day, there was an average of 40 aphids per colony in chlorantraniliprole treatments, 78 aphids in novaluron treatments, and 54 aphids in the control. The abundance of aphids was statistically different between the three treatments ($\chi^2 = 8.084$, $df = 2$, $p = 0.018$). Due to time and economic/logistic constraints, the sampling continued despite the insecticides being washed off and the number of aphid colonies being below the initial target of 100-120 aphids. For summer 2020, the insecticides and the control were sprayed on the 26th of June. There was an average of 111 aphids per colony in chlorantraniliprole, 114 aphids in novaluron, and 110 aphids in the control treatments. The initial abundance of aphids did not differ between the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments ($\chi^2 = 1.784$, $df = 2$, $p = 0.410$).

Two redundancy analyses were done to see which environmental factors affected the repartition of the aphidophagous species (**Fig. 2.2**). The ordination built with the environmental variables explained the scattering of the aphid predators in the plots for 2019 and 2020 ($df = 5$, $F = 4.801$, $p = 0.0009$ and $df = 7$, $F = 6.444$ and $p = 0.0009$ respectively). In the ordination of 2019, 3.4 % of the total variance of the matrix of insect abundance was explained by the environmental variance (axis 1 explained 1.4 % of the variance, $F = 9.601$, $p = 0.003$; axis 2 explained 1.1 % of the variance, $F = 7.712$, $p = 0.006$; axis 3 explained 0.9 % of the variance, $F = 6.407$, $p = 0.007$). In the ordination of 2020, 2.4 % of the total variance of the matrix of insect abundance was explained by the environmental variance (axis 1 explained 1.2 % of the variance, $F = 20.91$, $p = 0.0001$; axis 2 explained 0.85 % of the variance, $F = 14.45$, $p = 0.0001$; axis 3 explained 0.33 % of the variance, $F = 5.652$, $p = 0.004$). In 2019, the environmental factors influencing the occurrence of aphidophagous species were Aphids, Day, Novaluron, Block 1 and Ants (**Fig. 2.2a**). In 2020, all of the 2019 environmental factors influenced the occurrence of aphidophagous species with the exception of the block. Specific to 2020, we found that the Rain, Colonies, and the Border had an influence (**Fig. 2.2b**).

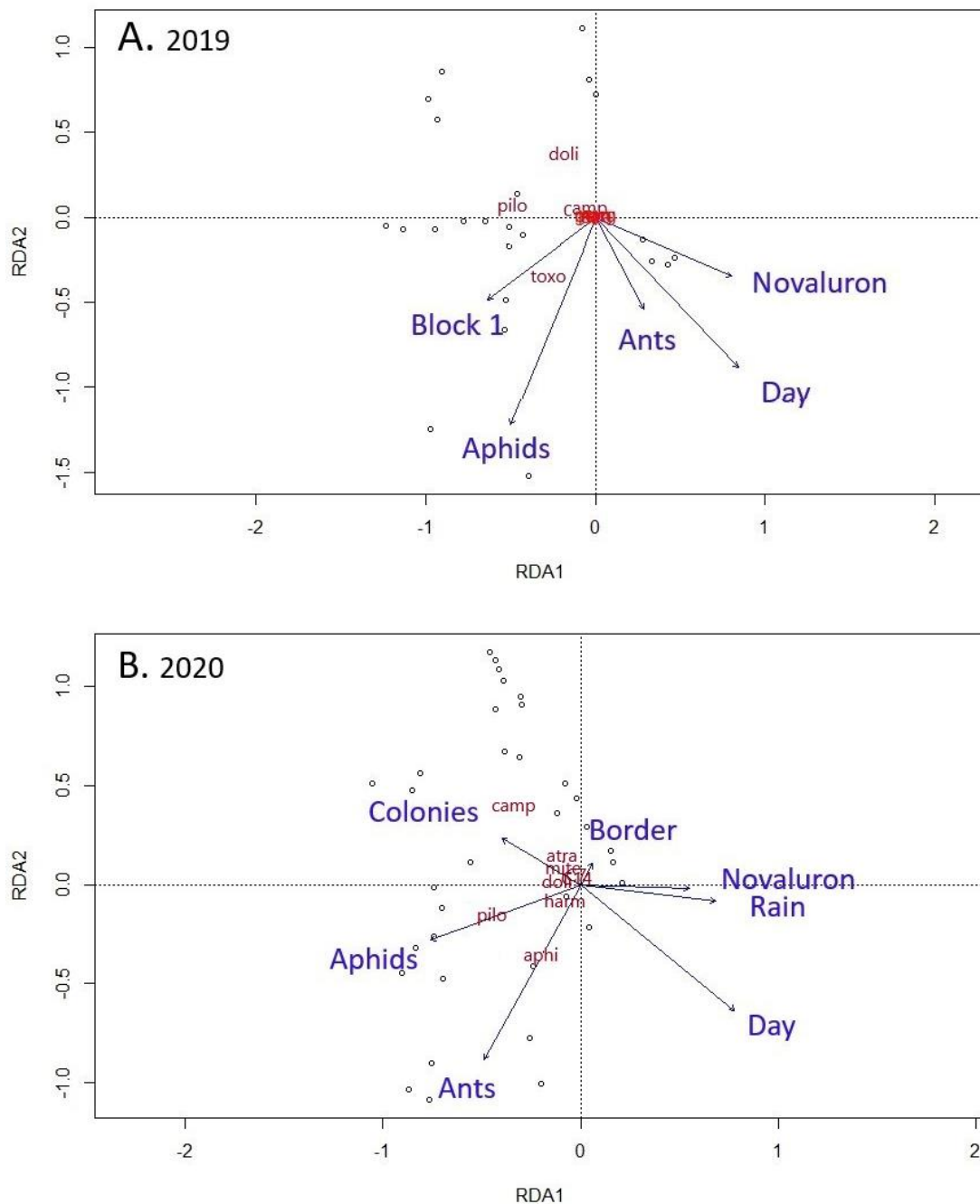


Figure 2.2. RDA biplot scaling type 2, showing the relationship between environmental factors (in blue) and aphidophagous species (in red) A. in 2019 ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.066$). B. in 2020 ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.072$). Species abbreviations: pilo: *Pilophorus perplexus*, aphi: *Aphidoletes aphidimyza*, camp: *Campylomma verbasci*, doli: Dolichopidae, atra:

Atractotomus mali, mite: predatory mite, harm: *Harmonia axyridis*, C7: *Coccinella septempunctata*, C14: *Propylea quatuordecimpunctata*, Toxo: *Toxomerus* spp.

In 2019, 265 individuals of seven aphidophagous species were observed and in 2020 there were 249 individuals of nine aphidophagous species (**Fig. 2.3**). The most abundant species for the control treatment were adult long-legged flies from the family Dolichopidae and larvae of a mirid bug *Pilophorus perplexus* in 2019. In 2020, *P. perplexus*, aphid midge larvae *Aphidoletes aphidimyza* and mullein bugs *Campyloma verbasci* were the most abundant species. Most species were observed both in 2019 and 2020, except for hoverflies *Toxomerus* sp. that were only seen in 2019 and predatory mites, seven-spotted ladybeetles and twelve-spotted ladybeetles only seen in 2020.

The mean abundance of aphidophagous predator observed per colony was 7.3, 4.6 and 5.8 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments, respectively, and 4.4, 7.0 and 5.2 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments for 2020. There were no significant differences in abundance between the treatments in 2019 ($\chi^2 = 1.683$, $df = 2$, $p = 0.431$) and 2020 ($\chi^2 = 3.759$, $df = 2$, $p = 0.153$). The mean species richness recorded per colony was 5.067, 3.600 and 5.067 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments, respectively, and 4.267, 6.73 and 5.733 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments for 2020. There were no significant differences in abundance between the treatments in 2019 ($\chi^2 = 2.269$, $df = 2$, $p = 0.322$) and 2020 ($\chi^2 = 4.775$, $df = 2$, $p = 0.092$). The mean Simpson diversity index for 2019 was 0.370, 0.407, and 0.457 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments, respectively, and 0.494, 0.509, and 0.469 for the novaluron, chlorantraniliprole and control treatments for 2020. There were no significant differences in guild diversity between the treatments in 2019 ($\chi^2 = 1.933$, $df = 2$, $p = 0.380$) and 2020 ($\chi^2 = 0.492$, $df = 2$, $p = 0.782$).

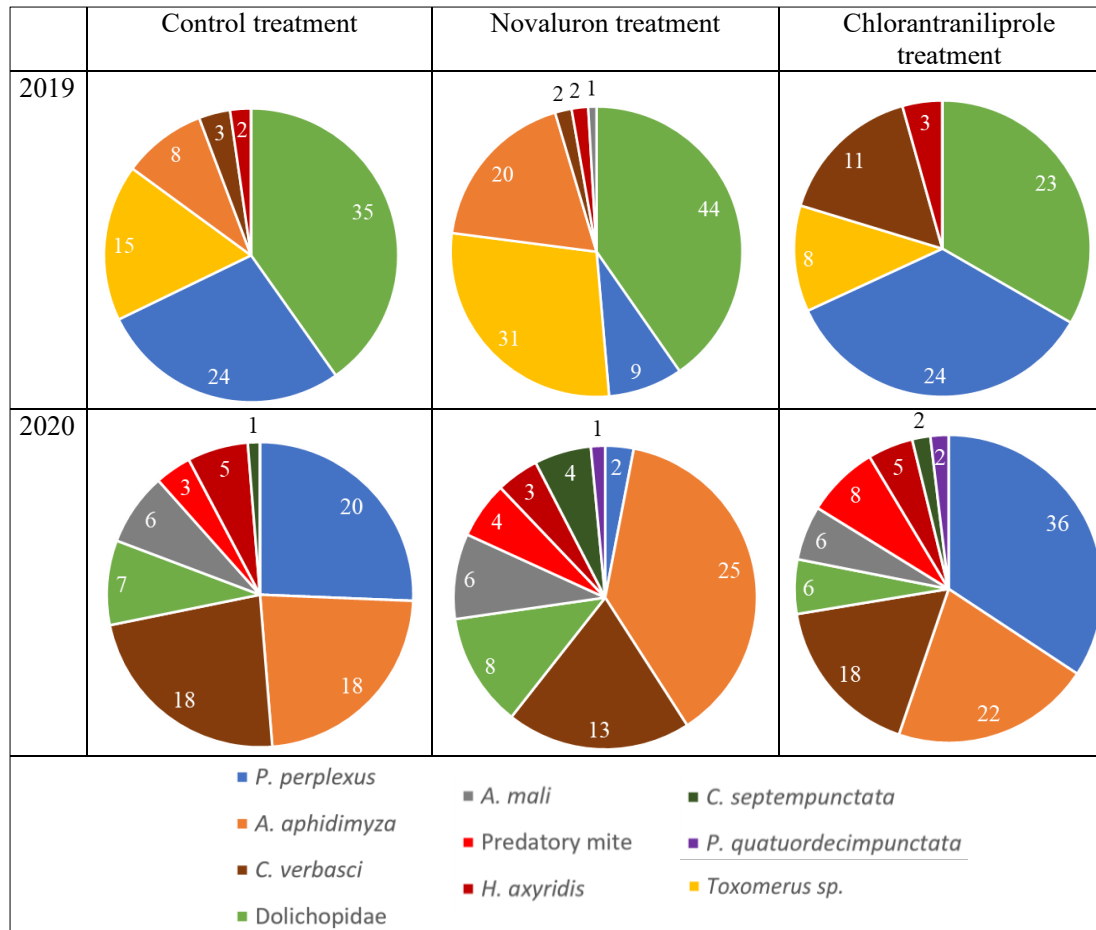
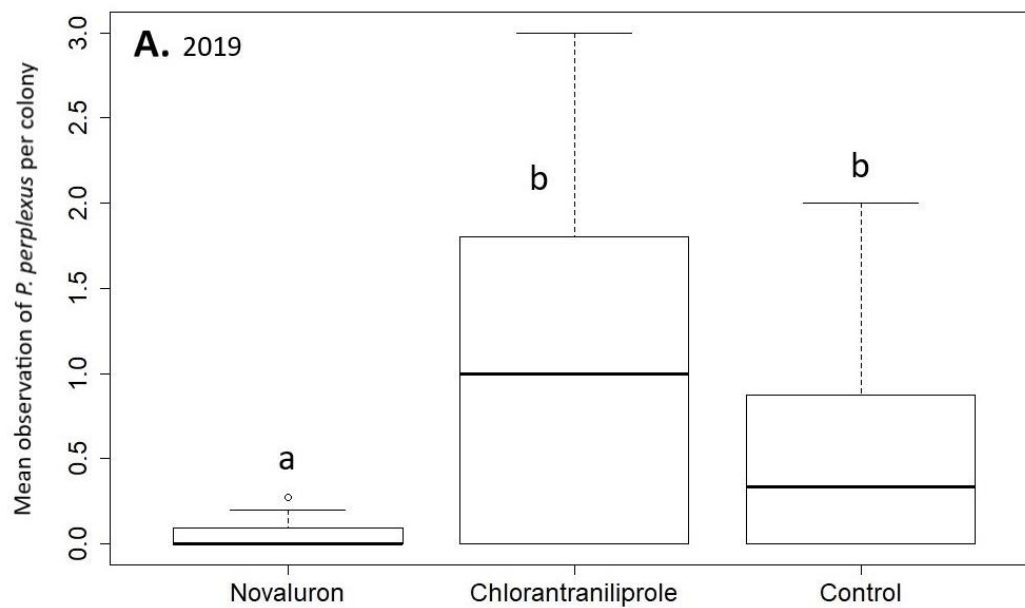


Figure 2.3. The abundance of aphidophagous species in each treatment, in 2019 and 2020. Numbers inside the chart represent the number of individuals observed for each species.

The distribution of the aphidophagous species in each treatment was modeled in 2019 and 2020 (Fig. 2.3). Due to the lack of aphids, the distribution data from 2019 was not analysed. In 2020, species were not evenly distributed between in each treatment ($\chi^2 = 27.387$, $df = 12$, $p = 0.0068$). Of the seven species observed in 2019 and nine species observed in 2020, the only species that was not evenly distributed between each treatment was *P. perplexus*. For each colony, the mean abundance of *P. perplexus* observed per aphid colony was calculated (Fig. 2.4). There were significantly fewer

observations of *P. perplexus* in the novaluron treatment, with ten to fifteen time less observations in the novaluron treatment than in the chlorantraniliprole and control treatments in 2019 ($\chi^2 = 8.013$, $df = 2$, $p = 0.018$; novaluron and chlorantraniliprole: $W = 140.5$, $p < 0.05$; novaluron and control: $W = 51$, $p < 0.01$; chlorantraniliprole and control: $W = 113$, $p = 0.477$) and 2020 ($\chi^2 = 9.500$, $df = 2$, $p < 0.01$; novaluron and chlorantraniliprole: $W = 49.5$, $p < 0.01$; novaluron and control: $W = 169$, $p < 0.05$; chlorantraniliprole and control: $W = 93.5$, $p = 0.440$).



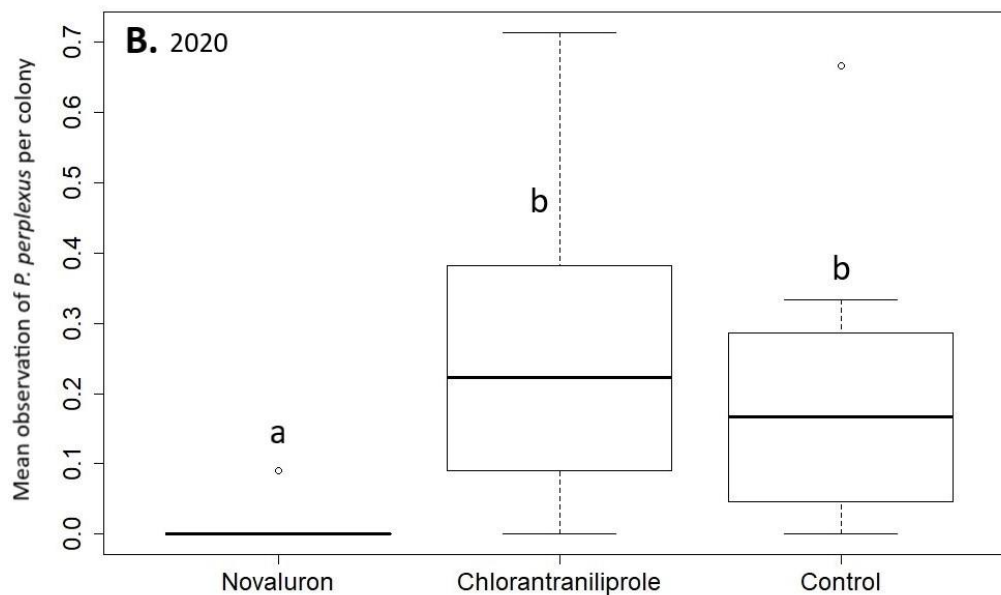


Figure 2.4. Mean abundance of *Pilophorus perplexus* observed per aphid colony for each treatment A. in 2019 ($\chi^2 = 8.013$, $df = 2$, $p = 0.018$); B. in 2020 ($\chi^2 = 17.089$, $df = 2$, $p = 0.00019$). The small circles represent extreme values and whisker represent standard error.

A comparison of the growth curves of the aphid colonies was done (**Fig. 2.5**). Three factors significantly affected the growth curves of the aphid colonies, i) the number of ants correlated with a higher intercept. In a linear model, the number of ants had a positive effect on the intercept (Estimate= 1.24, $df= 474.61$, $t= 7.22$, $p<0.001$) ii) the height of the branches influenced the shape of the growth curves. The number of aphids increased then decreased on low branches. On high branches, the number of aphids decreased fast then slower through time, iii) the insecticide treatment affected the shape of the aphid growth curve. The curves modeling the control and novaluron were not statistically different ($df=444$, $t=-1.54$, $p=0.12$). The curve modeling chlorantraniliprole and the control were statistically different ($df= 444$, $t= 3.19$, $p<0.05$) In the control treatment and the novaluron treatment, the number of aphids decreased

steadily through time. In the chlorantraniliprole treatment, the number of aphids remained steady for a few days and decreased rapidly after that.

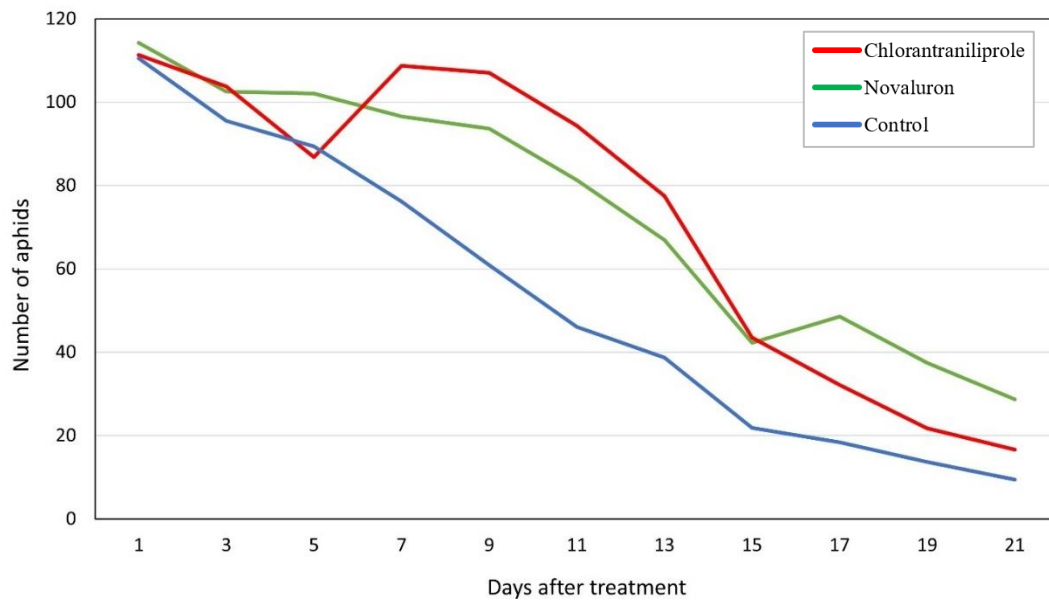


Figure 2.5. Average number of aphids per colony for each treatment after the insecticide applications in 2020.

2.5 Discussion

Insecticide treatments can have direct and indirect impacts on non-target organisms at different scales (El-Wakeil et Gaafar, 2020 ; Guedes *et al.*, 2016) and it is difficult to measure the impact of insecticides on the dynamic of a guild in the field, since intraguild interactions are complex and hardly measurable. This paper reports the impact of an insecticide on the diversity, abundance, and composition of aphidophagous species for three weeks after an insecticide application. The multivariate analyses highlighted several variables influencing the aphidophagous

guild. It is known that there is a succession of aphidophagous species through time (Brown, 1999 ; Pineda & Marcos-García, 2008), and that some species are density dependant (Lucas & Brodeur, 1999). Ants are known to attend aphid colonies (Miñarro *et al.*, 2010), and tend to be more aggressive toward active predators (coccinellids, mirids, reduviids, nabids, forficulid, etc.) than furtive predators (cecidomyiids, chamaemyiids and syrphids) (Guénard *et al.*, 2018). For these reasons we expected, and we observed the variables for Day, Aphids, and Ants to influence the aphidophagous guild. The number of ants guarding the colonies correlated with a higher number of aphids. There seemed to be an effect of the position of the colonies with the variable Block 1 for 2019 and Border for 2020. This could be explained by the heterogeneity of the vegetation as there is a trail close to the border where the grass height and wildflowers are different, which could influence the presence and abundance of natural enemies. Fréchette *et al.* (2008) demonstrated in a field study that the type of ground cover in an apple orchard could impact the occurrence of green aphid predators like Cecydomiidae and Coccinellidae. In the multivariate analysis for 2020, the number of aphids in colonies nearby correlated with the observations of *Pilophorus perplexus* and *Campyloma verbasci*. Finally, the occurrence of rain seemed to have influenced the presence of predators in 2020. It has been shown previously that foraging behaviors can be influenced by the occurrence of precipitation (Antiqueira *et al.*, 2020). It is interesting to note that in both multivariate analyses, novaluron was a significant variable to describe the aphidophagous guild.

In this paper, the abundance and diversity of the aphidophagous guild did not differ statistically between the novaluron, chlorantraniliprole, and control treatments in 2019 and 2020. The results do not support the hypothesis that chlorantraniliprole would impact the presence or abundance of any aphidophagous species. On the other hand, novaluron was harmful to a predatory mirid bug *Pilophorus perplexus*, which supports the hypothesis that novaluron would be less selective than chlorantraniliprole. The species *P. perplexus* is described as a generalist predator, feeding on small insects such

as aphids, psyllids, mealybugs and red spider mites (Niemczyk, 1999). Even though *P. perplexus* is an abundant mirid bug found in apple orchards its importance as a natural enemy is not well documented (Kondorosy *et al.*, 2010). In Japan, a species from the same genus, *Pilophorus typicus* Distant (Heteroptera: Miridae), is being studied as a potential biological control agent against the sweet potato whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) (Ito *et al.*, 2011 ; Nishikawa *et al.*, 2010). Nakahira *et al.* (2010) studied the side effects of several insecticides on *P. typicus* and found that novaluron and two other insect growth regulators were harmful to the nymphs. They also found that novaluron was harmless to the adults. Our experiment took place in June and July when most *P. perplexus* are at a larval stage (Braithwaite *et al.*, 1982). The sampling in 2019 was done after the insecticides were washed off twice. As both novaluron and chlorantraniliprole have transcuticular mobility into the leaves (Ishaaya *et al.*, 2003; Lahm *et al.*, 2009), a portion of the active ingredients remained after each storm. While the exact concentrations of the insecticide residues on leaves were unknown after being washed-off, predatory mirid bug *P. perplexus* was still sensitive to novaluron. This indicated that *P. perplexus* is highly sensitive to novaluron. In the past, broad-spectrum insecticides have caused the extinction of mirid bugs, like *Hyaliodes vitripennis* (Say) (Hemiptera: Miridae) in canadian apple orchards (Firlej *et al.*, 2003). Later, *H. vitripennis* was studied to be reintroduced because of its efficiency in controlling phytophagous mites.

Insecticides can disrupt important processes like the biological control of aphids (Beers *et al.*, 2016a; Croft, 1990; Guedes *et al.*, 2016). In our paper, since the aphid colonies took the same time to decline to zero between the control and the insecticide treatment, we considered that the biological control of aphids was not disrupted even though the growth curve in chlorantraniliprole treatments did not show the same shape. Even if *P. perplexus* were significantly less present in novaluron treatments, the overall processes of biological control were not disrupted. This highlights the importance of having a

diverse guild. When a species is absent, other species from the guild compensate (Liere *et al.*, 2017).

This paper does not report the effects of insecticides that are not immediate or visible to the naked eye. For example, insecticides can have sublethal effects on reproduction or on the behavior of non-target organisms. This study did not record toxicity toward the ladybeetles, for example. Nonetheless Cabrera *et al.* (2018) found that novaluron lowers greatly and durably the fecundity and fertility of female multicolored Asian ladybeetles. Also, novaluron has been shown to have a transovarial activity in beneficial insects where the offspring have lethal or sublethal effects after the adult females have been exposed to the insecticides (Joseph, 2020 ; Kim *et al.*, 2019). The sublethal effects of insecticides on reproduction can only be recorded after one or several generations, so their overall impact on a guild may be underestimated. Furthermore, around 15 pesticide treatments are used every year in Canadian apple orchards (Bradshaw & Hazelrigg, 2018), so any guild exploiting one of the 40 significant pests of apple trees is exposed to an array of different products sprayed along the season. While novaluron and chlorantraniliprole did not disrupt the biological control of green aphids, the combined and additive effect of other pesticide treatments remains unknown. The biological control of aphids is more likely to be hindered if the guild is exposed to more pesticides as it is already compensating for the absence of *P. perplexus*.

In conclusion, this study indicated that novaluron modifies the structure of the aphidophagous guild, especially by reducing drastically the abundance of *P. perplexus*, one of the most abundant predators observed on the control aphid colonies. As *P. perplexus* is a not well studied generalist predator, its ecological importance in apple orchards is unknown. The absence of *P. perplexus* in the novaluron treatment did not disrupt the biological control of green aphids, but the absence of this predator could impact the biological control of other aphid species, mites, leafhoppers or other small

pests. Chlorantraniliprole and novaluron did not cause a secondary pest outbreak. This shows the importance of having a diverse aphidophagous guild, so when an insecticide is harmful to some natural enemies, the overall biological processes are not necessarily disrupted. More field experiments are necessary to study the combined impact of insecticides on non-target organisms and the consequences on the biological processes.

2.6 Acknowledgement

Funding of this project was provided by the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food of Quebec through the Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région. We want to thank Jill Vandermeerschen for her advice in statistical analyses and Marc Fournier for the technical support. We want to thank the anonymous native English speaker who proofread the manuscript.

2.7 References cited

- Antiqueira, P. A. P., de Omena, P. M., Gonçalves-Souza, T., Vieira, C., Migliorini, G. H., Kersch-Becker, M. F., & Romero, G. Q. (2020). Precipitation and predation risk alter the diversity and behavior of pollinators and reduce plant fitness. *Oecologia*, *192*(3), 745–753. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04612-0>
- Beers, E. H., Horton, D. R., & Miliczky, E. (2016). Pesticides used against *Cydia pomonella* disrupt biological control of secondary pests of apple. *Biological Control*, *102*, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.05.009>
- Bradshaw, T. L., & Hazelrigg, A. (2018). Status of IPM practice adoption in Vermont apple orchards. *College of Agriculture and Life Sciences Faculty Publications*, (28), 1–29. Retrieved from <https://scholarworks.uvm.edu/calsfac/28>
- Braimah, S. A., Kelton, L. A., & Stewart, R. K. (1982). The predaceous and phytophagous plant bugs (Heteroptera: Miridae) found on apple trees in Quebec. *Naturaliste Canadien*, *109*(2), 153–180.

- Brown, M. (1999). Temporal changes in the aphid predator guild in eastern North America. *IOBC-WPRS Bulletin*, 22(6), 7–11.
- Cabrera, P., Cormier, D., & Lucas, E. (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.
<https://doi.org/10.1007/s10340-018-0978-9>
- Cabrera, P., Cormier, D., & Lucas, E. (2017). Differential sensitivity of an invasive and an indigenous ladybeetle to two reduced-risk insecticides. *Journal of Applied Entomology*, 141(9), 690–701. <https://doi.org/10.1111/jen.12391>
- Collyer, E. (1976). Integrated control of apple pests in New Zealand 6. Incidence of european red mite *Panonychus ulmi* (Koch) and its predators. *New Zealand Journal of Zoology*, 3(1), 39–50.
<https://doi.org/10.1080/03014223.1976.9517899>
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. John Wiley and Sons Inc. New York, USA.
- Cutler, G. C., Scott-Dupree, C. D., Tolman, J. H., & Harris, C. R. (2006). Toxicity of the insect growth regulator novaluron to the non-target predatory bug *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Biological Control*, 38, 196–204.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.12.016>
- Dinter, A., Brugger, K., Bassi, A., Frost, N., & 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. *Pesticides and Beneficial Organisms*, 35, 128–135.
- Döker, I., Pappas, M. L., Samaras, K., Triantafyllou, A., Kazak, C., & Broufas, G. D. (2015). Compatibility of reduced-risk insecticides with the non-target predatory mite *Iphiseius degenerans* (Acari: Phytoseiidae). *Pest Management Science*, 71(9), 1267–1273. <https://doi.org/10.1002/ps.3921>
- El-Wakeil, N., & Gaafar, N. (2020). Predacious insects and their efficiency in suppressing insect pests. In *Cottage Industry of Biocontrol Agents and Their Applications* (pp. 133–155). Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-33161-0_4
- EPA. (2020). *Conventional reduced risk pesticide program*. Retrieved November 20, 2020, from <https://www.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program>

- Firlej, A., Chouinard, G., Morin, Y., Cormier, D., & Coderre, D. (2003). Établissement et dispersion du prédateur *Hyaliodes vitripennis* (Hemiptera: Miridae) suite à des introductions dans une pommeraie commerciale au Québec. *Phytoprotection*, *84*(2), 93–103. <https://doi.org/10.7202/007812ar>
- Guedes, R. N. C., Smagghe, G., Stark, J. D., & Desneux, N. (2016). Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annual Review of Entomology*, *61*(1), 43–62. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023646>
- Guénard, B., Dumont, F., Fréchette, B., Francoeur, A., & Lucas, É. (2018). May furtive predation provide enemy free space in ant-tended aphid colonies? *PLoS ONE*, *13*(10), e0204019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204019>
- Ishaaya, I., Kontsedalov, S., & Horowitz, A. R. (2003). Novaluron (Rimon), a novel IGR: Potency and cross-resistance. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, *54*(4), 157–164. <https://doi.org/10.1002/arch.10113>
- Ito, K., Nishikawa, H., Shimada, T., Ogawa, K., Minamiya, Y., Tomoda, M. & Arakawa, R. (2011). Analysis of genetic variation and phylogeny of the predatory bug, *Pilophorus typicus*, in Japan using mitochondrial gene sequences. *Journal of Insect Science*, *11*(18), 1–13. <https://doi.org/10.1673/031.011.0118>
- Joseph, S. V. (2020). Ingestion of novaluron elicits transovarial activity in *Stephanitis pyrioides* (Hemiptera: Tingidae). *Insects*, *11*(4), 1–10. <https://doi.org/10.3390/insects11040216>
- Kim, S. S., Vandervoort, C., Whalon, M. E., & Wise, J. C. (2019). Transovarial transmission of novaluron in *Choristoneura rosaceana* (Lepidoptera: Tortricidae), *Canadian Entomologist*, *353*(2014), 347–353. <https://doi.org/10.4039/tce.2013.78>
- Kondorosy, E., Markó, V., & Cross, J. (2010). Heteropteran fauna of apple orchards in South-East England. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, *45*(1), 173–193. <https://doi.org/10.1556/APhyt.45.2010.1.15>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2009.01.018>
- Lefebvre, M., Bostanian, N. J., Mauffette, Y., Racette, G., Thistlewood, H. A., & Hardman, J. M. (2012). Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari:

- Phytoseiidae). *Journal of Economic Entomology*, 105(3), 866–871.
<https://doi.org/10.1603/EC11260>
- Legendre, P., & Gallagher, E. D. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129(2), 271–280.
<https://doi.org/10.1007/s004420100716>
- Liere, H., Jha, S., & Philpott, S. M. (2017). Intersection between biodiversity conservation, agroecology, and ecosystem services. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(7), 723–760.
<https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1330796>
- Lucas, É., & Brodeur, J. (1999). Oviposition site selection by the predatory midge *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae). *Environmental Entomology*, 28(4), 622–627. <https://doi.org/10.1093/ee/28.4.622>
- Mills, N. J., Beers, E. H., Shearer, P. W., Unruh, T. R., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.05.006>
- Miñarro, M., Fernandes-Mata, G., & Medina, P. (2010). Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological Entomology*, 35, 206–215.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x>
- Morin, Y., & Chouinard, G. (2020). Les pucerons, Fiche No 78. *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (Eds. Chouinard, G. et Al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec. Retrieved from <https://reseaupommier.irda.qc.ca/?p=6469>
- Morin, Y., Cormier, D., & Chouinard, G. (2020). Le carpocapse de la pomme, Fiche No 76. *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (Eds. Chouinard, G. et Al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec. Retrieved from <https://reseaupommier.irda.qc.ca/?p=6431>
- Nakahira, K., Kashitani, R., Tomoda, M., Kodama, R., Ito, K., Yamanaka, S., & Arakawa, R. (2010). Side effects of vegetable pesticides on a predatory mirid bug, *Pilophorus typicus* Distant (Heteroptera: Miridae). *Applied Entomology and Zoology*, 45(2), 239–243. <https://doi.org/10.1303/aez.2010.239>
- Niemczyk, E. (1999). Occurrence and effectiveness of some predatory bugs (Heteroptera) in apple orchards. *Bulletin OILB/SROP*, 22(7), 21–29.

- Nishikawa, H., Shimada, T., Nakahira, K., & Arakawa, R. (2010). Thermal effect on the development and reproduction of an indigenous mirid bug, *Pilophorus typicus* Distant (Heteroptera: Miridae), a potential biological control agent in Japan. *Applied Entomology and Zoology*, *45*(2), 313–318. <https://doi.org/10.1303/aez.2010.313>
- OMAFRA. (2009). Green apple aphid. Retrieved January 7, 2021, from <http://www.omafra.gov.on.ca/IPM/english/apples/insects/green-apple-aphid.html#advanced>
- Pajac, I., Pejic, I., & Baric, B. (2011). Codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) – major pest in apple production: an overview of its biology, resistance, genetic structure and control strategies. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, *76*(2), 87–92.
- Pineda, A., & Marcos-García, M. Á. (2008). Seasonal abundance of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae) and their population levels in and outside Mediterranean sweet pepper greenhouses. *Annals of the Entomological Society of America*, *101*(2), 384–391. [https://doi.org/10.1603/0013-8746\(2008\)101\[384:SAOAH2\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0013-8746(2008)101[384:SAOAH2]2.0.CO;2)
- Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C., Holdcraft, R., Mason, K. S., & Isaacs, R. (2014). Relative toxicity and residual activity of insecticides used in blueberry pest management: mortality of natural enemies. *Journal of Economic Entomology*, *107*(1), 277–285. <https://doi.org/10.1603/EC13191>
- Stoeckli, S., Mody, K., & Dorn, S. (2008). *Aphis pomi* population development, shoot characteristics, and antibiosis resistance in different apple genotypes. *Journal of Economic Entomology*, *101*(4), 391–398. [https://doi.org/10.1603/0022-0493\(2008\)101](https://doi.org/10.1603/0022-0493(2008)101)
- Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: a discussion of the differences between the Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC). *Psychological Methods*, *17*(2), 228–243. <https://doi.org/10.1037/a0027127>
- Wise, J. C., Hulbert, D., & Vandervoort, C. (2017). Rainfall influences performance of insecticides on the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in apples. *Canadian Entomologist*, *149*(1), 118–128. <https://doi.org/10.4039/tce.2016.40>
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, *64*(2), 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>

CHAPITRE III

WHEN AN INSECTICIDE REGULATES INTRAGUILD PREDATION AMONG PREDATORS

Alice De Donder, Daniel Cormier, Marcela Rodríguez García and Éric Lucas

3.1 Résumé/Abstract

La coccinelle asiatique *Harmonia axyridis* (Pallas) est une espèce envahissante présente dans les vergers canadiens qui cause le déclin des coccinelles natives, comme la coccinelle maculée *Coleomegilla maculata* DeGeer, via la prédation intraguilde ou une compétition par exploitation. Les deux espèces sont exposées au novaluron, un insecticide à risques réduits utilisé contre le carpocapse de la pomme *Cydia pomonella* (L.), le ravageur principal en pomiculture. Des études de laboratoire ont montré que le novaluron affecte peu la coccinelle maculée alors qu'il est très toxique pour la coccinelle asiatique. Le novaluron réduit la valeur adaptative de la coccinelle asiatique mais n'influence pas celle de la coccinelle maculée. On ignore l'impact du novaluron et de la prédation intraguilde dans des conditions naturelles. Notre étude explore dans

des conditions de semi-terrain l'effet des résidus de novaluron et de la prédation intragilde sur la survie de larves de coccinelles maculées et asiatiques. Nos résultats indiquent que le novaluron est toxique pour les larves de premier stade de coccinelles maculées et asiatiques après dix jours d'exposition continue. Le novaluron n'a pas changé le résultat de la prédation intragilde quand la coccinelle maculée est le prédateur intragilde. En revanche, le novaluron augmente la survie des proies intragildes lorsque la coccinelle asiatique est le prédateur intragilde. Ces résultats indiquent que le novaluron peut influencer la dominance de la coccinelle asiatique, ce qui pourrait changer la dynamique de l'assemblage des coccinelles en verger.

Mots clés : Insecticide à risques réduits, espèce envahissante, coccinellidés, expérience semi-terrain, prédation intragilde.

The Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Pallas) is an invasive species commonly found in Canadian apple orchards. It threatens native ladybeetles through exploitative competition and intraguild predation (IGP), including the twelve spotted ladybeetle *Coleomegilla maculata* DeGeer. Both species are exposed to novaluron, a reduced risk insecticide used against the primary pest in apple orchards the codling moth *Cydia pomonella* (L.). Previous laboratory research showed that novaluron is highly toxic for the invasive *H. axyridis*, but is less toxic for the indigenous *C. maculata*. Novaluron reduces the adaptive value of IGP for *H. axyridis* but not for *C. maculata*. We lack knowledge on the combined effect of novaluron and IGP under natural conditions. Our study explores under semi-field conditions the effect of novaluron residues and IGP on the survival of *H. axyridis* and *C. maculata* larvae. Results showed that novaluron was toxic for first instar larvae of both species after ten days of exposure. When *H. axyridis* was the intraguild predator, novaluron increased the survival of the intraguild preys. Novaluron did not change the outcome of the IGP when *C. maculata* was the intraguild predator. These results indicate that novaluron can impact the dominance of the invasive *H. axyridis* on native ladybeetles which could change the dynamics of ladybeetle assemblage.

Key words: Reduced risk insecticide, invasive species, coccinellids, semi-field experiment, IGP.

3.2 Introduction

One of the most abundant and widespread herbivore in apple orchards is the green apple aphid *Aphis pomi* DeGeer (Hemiptera: Aphididae) (Stoekli *et al.* 2008). In the province of Quebec in Eastern Canada, insecticides are rarely used against green apple aphids due to the presence of the aphidophagous species, like ladybeetles, that control populations below economic threshold (Fréchette *et al.* 2008; Morin and Chouinard 2014). The efficacy of aphids biological control depends on a variety of biotic, abiotic, and anthropic factors (Croft 1990). A major anthropic factor is the use of pesticides that can greatly affect the efficacy of biological control. Insects can directly and indirectly be impacted by these pesticides (Desneux *et al.* 2007; Guedes *et al.* 2016). Direct exposure to pesticides can induce mortality and/or sublethal effects on insects. They can also drive habitat changes and alter interactions between insect species within food webs. Insecticides may also disrupt the biological control of secondary pests, which can then lead to a secondary pest outbreak after its use (Croft 1990; Dutcher 2007). For example, Beers *et al.* (2016) recorded a decrease in abundance of the aphidophagous predator *Forficula auricularia* L (Dermaptera: Forficulidae) and a subsequent increase of the woolly apple aphid populations *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) (Hemiptera: Aphididae), after the application of spinetoram and novaluron in an apple orchard.

This study focuses on two aphidophagous ladybeetle species, i) a native canadian species, the twelve spotted ladybeetle *Coleomegilla maculata* DeGeer, and ii) an invasive ladybeetle in North America, the multicolored Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). The arrival of *H. axyridis* is linked to the decline of the native Coccinellidae guild (Bahlai *et al.* 2014; Brown and Roy 2018; Castro-Guedes *et al.* 2020). *Harmonia axyridis* threatens native ladybeetles, including *C. maculata*, through exploitative competition and/or intraguild predation (Evans 2004;

Labrie *et al.* 2006; Lucas *et al.* 2007). Both species are commonly found in apple orchards where they are exposed to numerous insecticides. One of them, novaluron (Rimon 10 EC), a reduced-risk insecticide, is an insect growth regulator that inhibits the synthesis of chitin (Cutler and Scott-Dupree 2007). Novaluron is used against the primary pest in apple orchard, the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). It targets the eggs of the codling moth through abnormal endocuticular deposition and abortive molting. Several laboratory experiments evaluated the toxicity of novaluron on *C. maculata* and *H. axyridis* at different life stages and following different routes of exposure (Cabrera *et al.* 2014, 2017, 2018). After topical exposure or ingestion of contaminated preys, a high larval mortality was recorded six days after exposure for first instar *H. axyridis* whereas first instar *C. maculata* were not affected (Cabrera *et al.* 2014, 2017). The exposure to 24h old residues, resulted in a high mortality for both *H. axyridis* and *C. maculata* first instar larvae. However when the eggs were exposed topically to novaluron the mortality did not increase for either species (Cabrera *et al.* 2017). Despite this, when the adults ingested contaminated preys, *H. axyridis* had a reduced fecundity and fertility, whereas *C. maculata* did not exhibit any sublethal effects (Cabrera *et al.* 2018). Overall, novaluron is drastically more toxic for *H. axyridis* than for *C. maculata*.

Intraguild predation (IGP), a very common interaction amongst coccinellids, is a major source of mortality for young instars (Gagnon *et al.* 2011; Lucas 2012). IGP is a complex interaction involving three actors, the IG predator (the top predator), the IG prey (the competitor) and the XG prey (the shared resource) (Polis *et al.* 1989; Lucas and Maisonhaute 2019). Because of drastic changes in size, mobility, vigour and defensive capacity during their life cycle, ladybeetles can be found at different times either as the IG predator or as the IG prey (Lucas 2005, 2012). Molecular analysis of the gut content of ladybeetles showed that IGP between coccinellid species is common in nature (Gagnon *et al.* 2011). Mutual IGP is asymmetrical in favour of the larger species that are generally more successful in confrontation (Lucas and Maisonhaute

2019). *Harmonia axyridis* and *C. maculata* are known to partake in mutual IGP. *Harmonia axyridis* has a dominant role in IGP because of its high voracity and aggressiveness (Cottrell 2004; Mirande *et al.* 2015; Brown and Roy 2018).

Ecotoxicology studies are often done under laboratory settings focusing on a single species, assessing short-term mortality and lethal concentrations (Guedes *et al.* 2016; De Armas *et al.* 2020). Other studies focus on intraguild interactions between species (Hoogendoorn and Heimpel 2004; Mirande *et al.* 2015). Few studies focus on the combined effect of insecticides and IGP on natural enemies. Provost *et al.* (2003) determined that IGP may increase a predator exposure to pesticides. Cabrera *et al.* (2018) evaluated the impact of novaluron on the adaptive value of intraguild predation between *H. axyridis* and *C. maculata* under laboratory settings. They determined that novaluron reduced the adaptive value of IGP for *H. axyridis* but not for *C. maculata*. However, *H. axyridis* recovered the adaptive value across time as *C. maculata* neutralized the insecticide. Unfortunately laboratory results may not be extrapolated to the field because insecticides can be degraded through biotic and abiotic factors in the latter system (Schmuck *et al.* 1997; Guedes *et al.* 2016). For example, pesticide residues can be absorbed by the plant, and precipitations, evaporation, or UV light can affect the concentrations and alter the properties of the active ingredients (Croft 1990; Fenner *et al.* 2013; Guedes *et al.* 2016). Since laboratory experiments do not replicate all field conditions, semi-field and field experiments are necessary to validate the results of laboratory tests on the toxicity of insecticides on natural enemies (Guedes *et al.* 2016).

The first objective of the present study was to determine, in a semi-field experiment, the mortality rate of first instar ladybeetle larvae after an exposure to insecticide residues and insecticide-treated aphids for ten consecutive days. The aim is to simulate the scenario where *C. maculata* and *H. axyridis* eggs hatch two days after an insecticidal treatment and the newly hatched larvae are exposed to contaminated aphids,

and aged residues. Our hypothesis was that novaluron would cause a high mortality for *H. axyridis*, and no mortality for *C. maculata* larvae. The second objective was to study under semi-field conditions the combined effects of novaluron and IGP on the native ladybeetle *C. maculata* and the invasive *H. axyridis* by confronting a third instar ladybeetle larvae (IG predator) with three first instars larvae (IG prey), and green apple aphids (XG preys). Our hypothesis was that novaluron would not change the outcome of the IGP when *C. maculata* is the IG predator because *C. maculata* is not harmed by novaluron. However, our hypothesis was that novaluron would increase the survival of *C. maculata* (IG prey) when *H. axyridis* is the IG predator because *H. axyridis* is sensitive to novaluron and IGP increases a predator's exposure to insecticide (Provost *et al.* 2003), and as the IG predator is affected by novaluron, we expect the intensity of the IGP to decrease which translates to an increase survival of the IG preys.

3.3 Material and methods

3.3.1 Insects

Coleomegilla maculata and *Harmonia axyridis* were reared in a laboratory before being transferred to the field. *Coleomegilla maculata* adults were collected in 2019 in a large untreated area at Saint-Nicéphore, Quebec, (45° 75' 36"N and 72° 38' 50"W). *Harmonia axyridis* adults were collected in 2012 at Sainte-Agathe, Quebec, (46° 23' 30" N and 71° 24' 33.5" W). New adults were added every year for *H. axyridis*. Both species were reared in growth chambers at 23°C, 16L:8D and 70% RH. Their diet consisted of grounded pollen, brine shrimp *Artemia sp.* cyst (Anostraca: Artemiidae), a sweetened water solution (sugar 10% w/v), and green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae). The latter was reared on potato plants *Solanum tuberosum* L. Larval diet consisted of green peach aphids *ad libitum*. Insect

rearing was performed at the Laboratoire de Lutte Biologique in the Université du Québec à Montréal, in Montreal, Canada.

Green aphids, *Aphis* spp. individuals of all developmental stages were collected only a few days prior the experiment on untreated apple trees from the experimental apple orchard at Saint-Bruno-de-Montarville (45°32'29.5"N and 73°20'24.4"W).

3.3.2 Insecticides

The concentration of novaluron (Rimon® 10 EC) insecticide corresponds to the field rates recommended for apple orchards in Quebec: 0.93 L of Rimon for 1000 L of water (100 g a.i./ha). A Weber® sprayer was used with a spray volume of 920 L/ha.

3.3.3 Field experiments

The experiment took place in the experimental apple orchard of the Research and Development Institute for the Agri-environment (45°32'29.5"N and 73°20'24.4"W). The orchard consists of dwarf McIntosh apple trees grafted on M.9 and planted in 2005. Each plot contains eight rows of 30 apple trees spaced 1.25 m apart and with 3.25 m between rows. Trees have a maximum height of 3.25 meters and width of 1.90 meter. The trees were not irrigated or fertilized during the year 2019. No insecticide treatments were done months prior to the experiment.

There were five experimental blocks, and each block consisted of two juxtaposed rows of 10 consecutive trees. In each experimental block, five vegetative shoots were selected on the two central trees on the row of 10 trees. Green aphids *Aphis* spp. colonies were placed on the vegetative shoots selected on August 17th, 2019. The



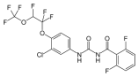


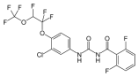


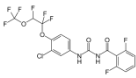


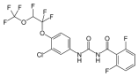


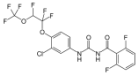
shoots were chosen at shoulder length to facilitate the sampling, and all insects were removed from the shoots before the addition of the aphids. Each colony consisting of 150 to 200 aphids was covered with a muslin cage to prevent predation, parasitism, and ant farming. These cages entailed tubes of plastic garden fencing covered with a tube of muslin fabric, with a hole size of 0.5 mm, closed at both end over a vegetative shoot with five leaves. The muslin tubes had a length of 50 cm and a diameter of 20 cm. The garden fencing tube had a length of 30 cm and a diameter of 15 cm. The cages create a mesocosm that allow natural abiotic factors such as precipitation or temperature to pass while controlling the species abundance and diversity in each cage. In every experimental block, rows of trees were treated either with water or with novaluron on August 22nd, 2019. The muslin cages were removed before the spraying to allow the water or insecticide to reach the branches with the added aphids colonies. 48 hours after the insecticide or water application, each colony was standardized to 100 aphids, ladybird larvae were added, and the shoots were covered with a muslin cage (**Table 3.1**). The first instar larvae added hatched the day before. The third instar larvae fed aphids *ad libitum* during their rearing were starved 24 h before being transferred to the field. The third instar larvae were considered as the IG predators because of their size and voracity relative to the first instar larvae (Lucas 2012). For 10 consecutive days, the number of aphids and the survival of each ladybird larvae was recorded.

3.3.4 Statistical analysis

The statistical analyses were performed using R statistical software version 3.6.1 (R Development Core Team, 2018). Kaplan-Meier curves were used to represent the survival curves of the ladybird larvae (Goel *et al.* 2010). The effect of the treatment (novaluron and water), and the presence/absence of an IG predator in the muslin cages on the survival of the first instar larvae were analysed with a Cox proportional hazards model (Fox and Weisberg 2011). The Schoenfeld residuals were tested to confirm that

all the variables met the assumption for the Cox regression model. A Wilcoxon-Mann-Whitney test was used to compare the number of IG predator alive in the control and in the novaluron treatment at day 10. The slope of the aphid growth curves was compared between each treatment, and it was determined whether the curves were linear, quadratic, or polynomial by comparing the Bayesian information criterion (BIC) for each equation. The best model was selected by choosing the equation with the lowest BIC (Vrieze 2012).

Table 3.1. Summary of treatments with visual representation.

| Cage composition | Visual representation | Exposition |
|---|--|---|
| <i>Aphids without predators</i> | | |
| 100 aphids treated with water |  |  |
| 100 aphids treated with novaluron | |  |
| <i>Larval survival without IG predator</i> | | |
| Three 1 st instar <i>C. maculata</i> + 100 aphids treated with water |  |  |
| Three 1 st instar <i>C. maculata</i> + 100 aphids treated with novaluron | |  |
| Three 1 st instar <i>H. axyridis</i> + 100 aphids treated with water |  |  |
| Three 1 st instar <i>H. axyridis</i> + 100 aphids treated with novaluron | |  |
| <i>Larval survival in presence of an IG predator</i> | | |
| Three 1 st instar <i>C. maculata</i> + one 3 rd instar <i>H. axyridis</i> + 100 aphids treated with water |  |  |
| Three 1 st instar <i>C. maculata</i> + one 3 rd instar <i>H. axyridis</i> + 100 aphids treated with novaluron | |  |
| Three 1 st instar <i>H. axyridis</i> + one 3 rd instar <i>C. maculata</i> + 100 aphids treated with water |  |  |
| Three 1 st instar <i>H. axyridis</i> + one 3 rd instar <i>C. maculata</i> + 100 aphids treated with novaluron | |  |

3.4 Results

3.4.1 Larval survival without IG predator

First instar *C. maculata* and *H. axyridis* survival was significantly affected by the novaluron application (HR = 6.712, 95% CI 1.78-25.2, $p = 0.0049$), (HR = 3.505, 95% CI 1.32-9.34, $p = 0.012$) (**Fig. 3.1**). After 10 days of exposure to novaluron-contaminated aphids and residues, 80% of *C. maculata* larvae and 87% of *H. axyridis* larvae died.

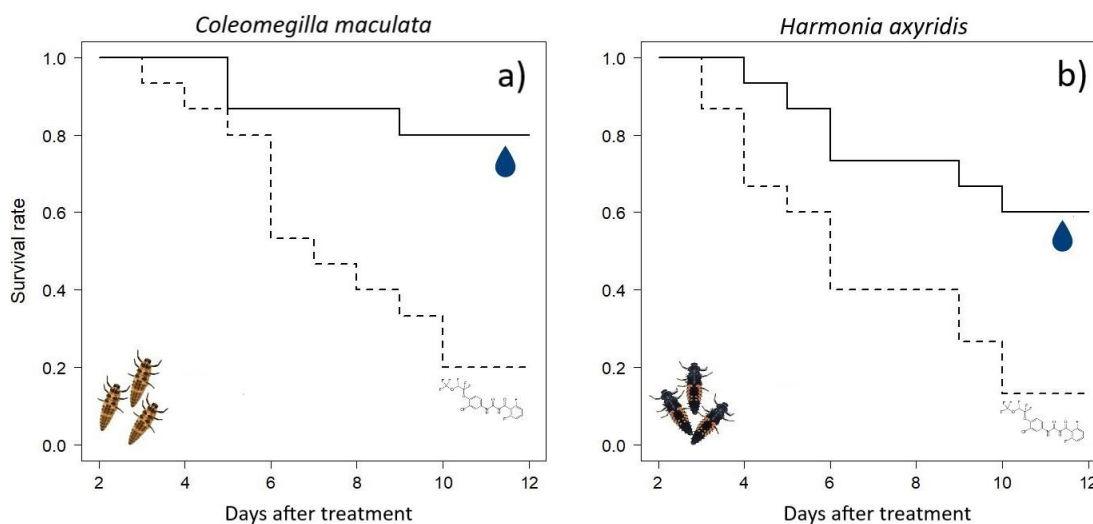


Figure 3.1. Survival of first instar ladybird larvae in presence of novaluron-treated aphids on apple leaves (dashed lines) and in the presence of water-treated plants and aphids (solid lines). a) *Coleomegilla maculata* (HR = 6.712, 95% CI 1.78-25.2, $p = 0.0049$). b) *Harmonia axyridis* (HR = 3.505, 95% CI 1.32-9.34, $p = 0.012$).

3.4.2 Larval survival with IG predator

At the end of the sampling period there were no significant differences between the number of third instar *C. maculata* and *H. axyridis* larvae alive between the water and the novaluron treatment ($W = 17.5, p = 0.270$).

3.4.2.1 *Coleomegilla maculata* as IG prey

In water-treated cages, the survival of the first instar *C. maculata* decreased when an IG predator was present when compared to the lack of predator (HR = 4.278, 95% CI 1.07-17.08, $p = 0.040$) (**Fig. 3.2a**). After ten days, 80% of *C. maculata* survived in water treated cages without IG predators, compared to 13.3% in cages with IG predators. In cages with novaluron-treated aphids and apple leaves, the survival of first instar *C. maculata* did not differ whether an IG predator was present or not (HR = 0.356, 95% CI 0.12-1.0, $p = 0.055$) (**Fig. 3.2b**).

In cages with first instar *C. maculata* larvae and an IG predator, a higher larval survival was recorded in novaluron-treated cages compared to water-treated cages (HR = 0.253, 95% CI 0.082-0.78, $p = 0.016$) (**Fig. 3.3a**). After ten days, 50% of *C. maculata* larvae survived in cages with novaluron and IG predators, compared to 13.3% in cages with IG predators but without novaluron.

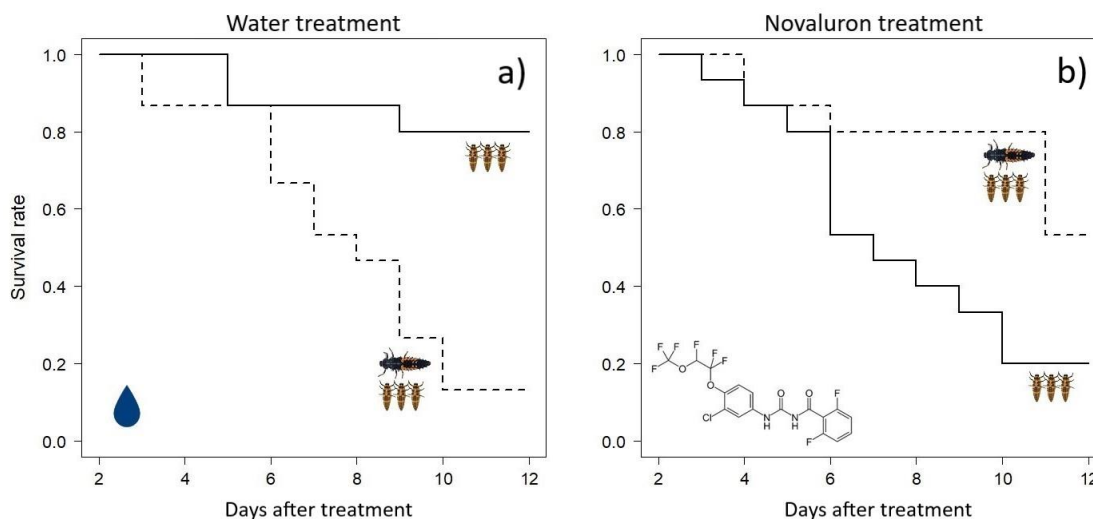


Figure 3.2. Survival of first instar *Coleomegilla maculata* larvae (IG preys) with (dashed lines) and without (solid lines) a third instar *Harmonia axyridis* (IG predator). a) in cages with water-treated aphids and apple leaves (HR = 4.278, 95% CI 1.07-17.08, $p = 0.040$). b) in cages with novaluron-treated aphids and apple leaves (HR = 0.356, 95% CI 0.12-1.0, $p = 0.055$).

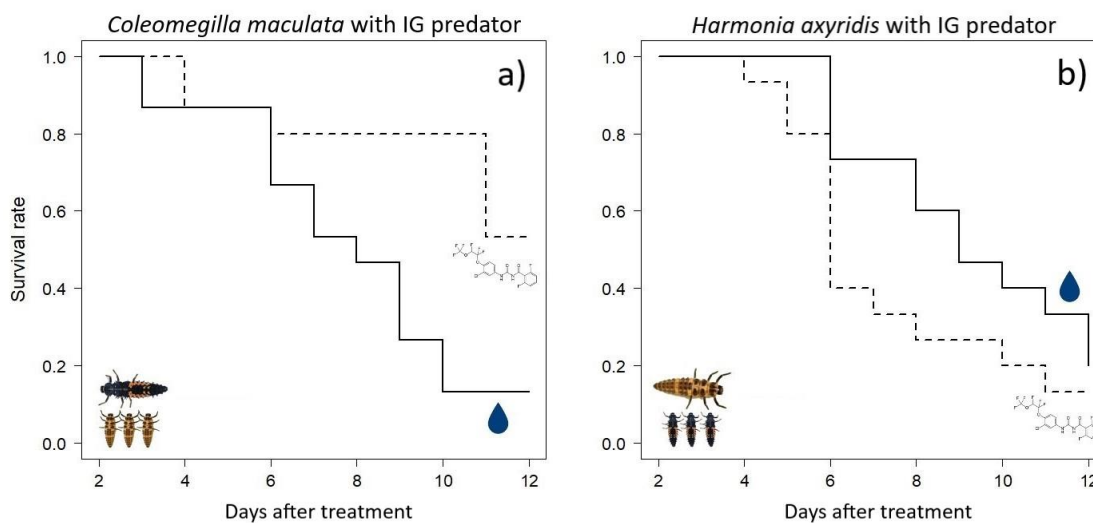


Figure 3.3. Survival of first instar ladybird larvae in presence of an IG predator in the control (solid lines) and in the insecticide treatment (dashed lines). a) *Coleomegilla maculata* first instar larvae with a third instar *Harmonia axyridis* (HR = 0.253, 95% CI 0.082-0.78, $p = 0.016$). b) *Harmonia axyridis* first instar larvae with a third instar *C. maculata* (HR = 1.700, 95% CI 0.72-4.00, $p = 0.225$).

3.4.2.2 *Harmonia axyridis* as IG prey

The survival of *H. axyridis* in water and novaluron-treated cages did not differ whether an IG predator was present or not (HR = 2.199, 95% CI 0.80-6.0, $p = 0.126$ (**Fig. 3.4a**) and HR = 0.810, 95% CI 0.37-1.8, $p = 0.593$ (**Fig. 3.4b**), respectively). In cages with first instar *H. axyridis* larvae and an IG predator, novaluron-treated cages and water-treated cages had a similar survival rate after ten days (HR = 1.700, 95% CI 0.72-4.00, $p = 0.225$) (**Fig. 3.3b**). After ten days, 13.3% of *H. axyridis* larvae survived in cages with novaluron and IG predators, compared to 20% in cages with IG predators but without novaluron.

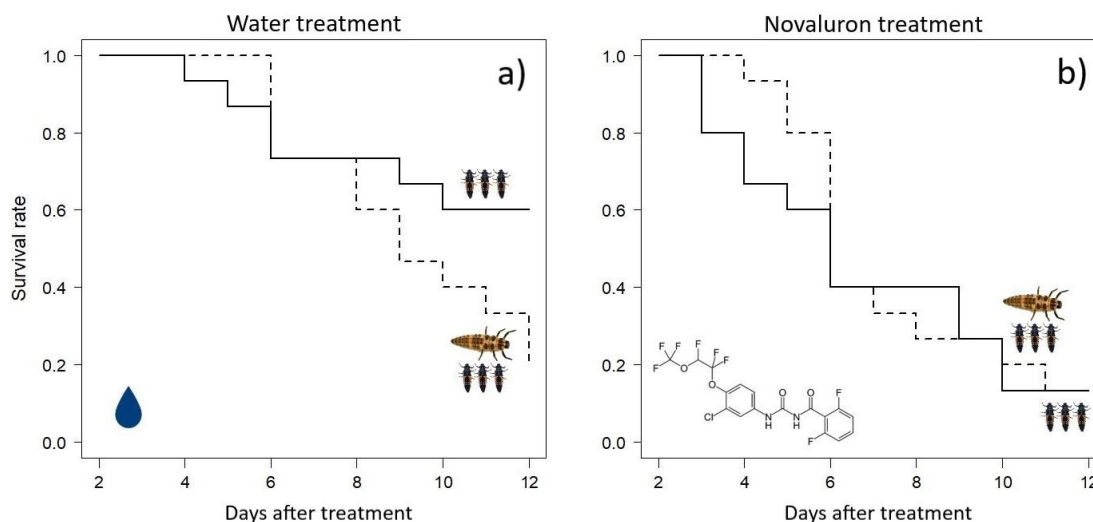


Figure 3.4. Survival of first instar *Harmonia axyridis* larvae in presence (dashed lines) or absence (solid lines) of a third instar *Coleomegilla maculata* as an IG predator. a) in cages with water-treated aphids and apple leaves (HR = 2.199, 95% CI 0.80-6.0, $p = 0.126$). b) in cages with novaluron-treated aphids and apple leaves (HR = 0.810, 95% CI 0.37-1.8, $p = 0.593$).

3.4.3 Aphids growth curves

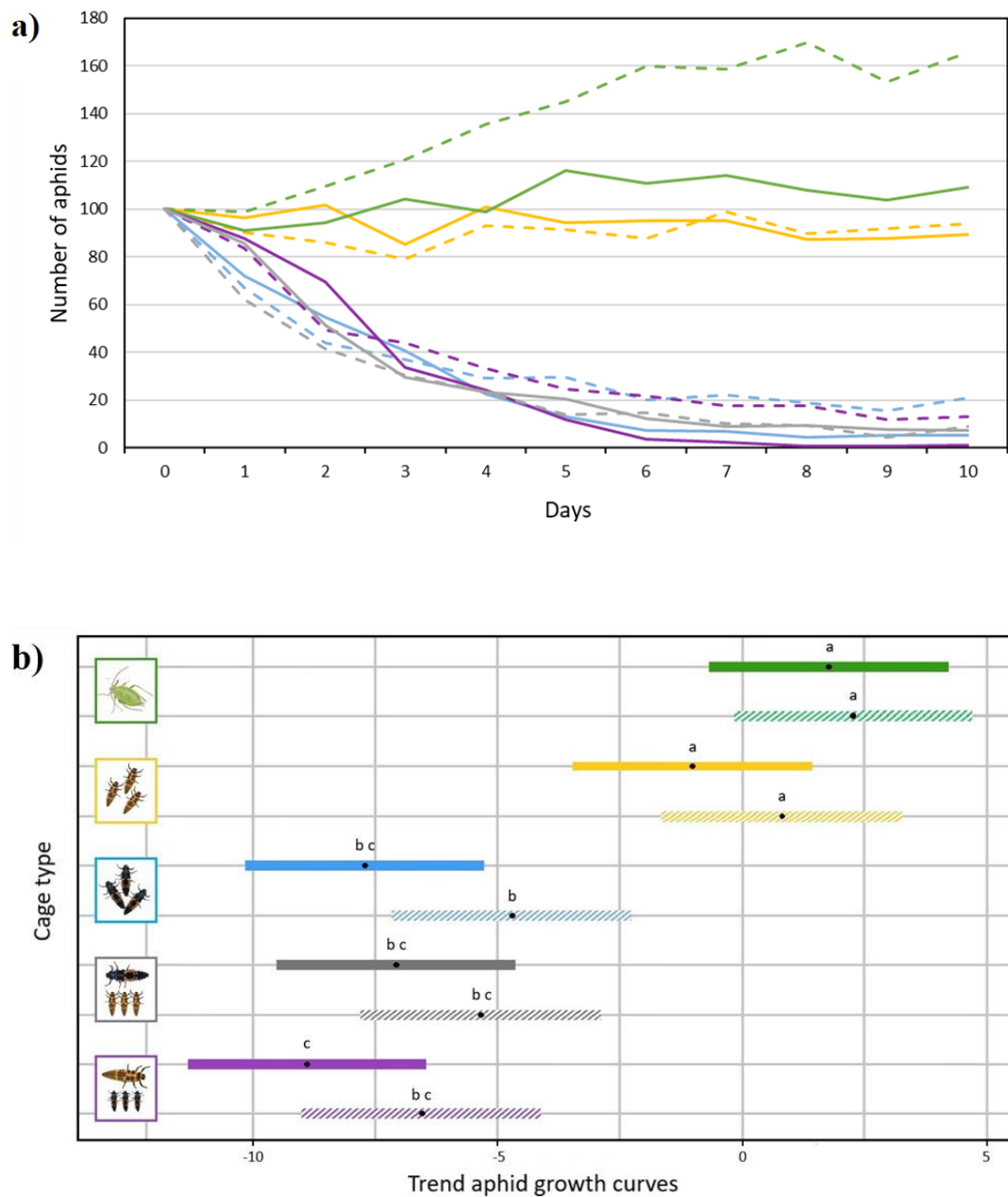


Figure 3.5. a) Growth curve of *Aphis* spp. colonies in each treatment. b) Trends of the growth curves of *Aphis* spp. colonies in each treatment. A slope above zero means the number of aphids is increasing with time and below zero means the opposite. Dashed

lines represent novaluron-treated aphid colonies feeding on novaluron-treated leaves. Solid lines represent water-treated aphid colonies feeding on water-treated leaves.

The linear model fitted the growth curves the best with a BIC of 4257.833. The slope of the *Aphis* spp. colonies growth curves was compared in each treatment (**Fig. 3.5a**). In cages with *H. axyridis* as a predator or as preys (blue, purple, grey lines), the number of aphids decreased with time (**Fig. 3.5b**). In cages without *H. axyridis* (green and yellow lines), the growth curves of green aphids colonies had the same trend, a stable or slightly increasing number of aphids with time.

3.5 Discussion

The results do not support the hypothesis that novaluron would cause a high mortality for *Harmonia axyridis* and would not affect *Coleomegilla maculata* larvae. Novaluron was very toxic for both *C. maculata* and *H. axyridis* first instar larvae (**Fig. 3.1**). Our predictions were based on the published study by Cabrera *et al.* (2014, 2017, 2018). They concluded that novaluron was toxic for *H. axyridis* following every route of exposure, but it was not toxic for *C. maculata*, except after exposure to 24h-aged residues. The assessment of the residual toxicity performed by Cabrera *et al.* was done under laboratory conditions where the insecticide sprayed in a Petri dish can not penetrate the plants, is not degraded by UV light nor diluted by precipitations (Croft 1990; Guedes *et al.* 2016). We expected the residues to be less toxic in this experiment as the residues were 48h old and aged under natural conditions when the ladybeetles were added. Cabrera *et al.* (2018) discussed that *C. maculata* is able to neutralize novaluron as the adaptive value of IGP for *H. axyridis* is recovered through time. The mechanisms behind the resistance of *C. maculata* larvae to novaluron are unknown. In this experiment, the ladybeetle larvae were exposed to novaluron residues and

contaminated preys for ten consecutive days. Possibly the resistance mechanisms of first instar *C. maculata* became inefficient as the detoxification mechanisms were overwhelmed from the continuous exposition to the insecticide (Schowalter 2011).

In the absence of the insecticide, first instar *C. maculata* had a higher mortality when an IG predator was present. On the other hand, they survived more in the insecticide treatment. This shows that the third instar *H. axyridis* caused mortality on the IG prey. It also reveals that when *H. axyridis* was the IG predator, *C. maculata* larvae survive more due to the *H. axyridis* being affected by novaluron. *Harmonia axyridis* is very sensitive to novaluron (Cabrera *et al.* 2014, 2017, 2018) and IGP increases a predator's exposure to insecticide (Provost *et al.* 2003) as when the IG predator consumes a contaminated XG prey and IG prey, it increases its exposition to the insecticide. Since the IG predator is affected by the insecticide, the intensity of the IGP decreases.

It has been recorded that insecticides can cause a shift in dominance between competing species (Cordeiro *et al.* 2014). Insecticides can theoretically reduce the intensity or symmetry of IGP, or change the direction of IGP among aphidophagous predators (Lucas 2005). Our research shows that novaluron increased the survival of the IG prey when *H. axyridis* was the IG predator. Novaluron could procure a refuge to resistant coccinellid species. This could have a major impact on multicolored Asian ladybeetle IG preys.

When *C. maculata* was the IG predator, the IG prey (*H. axyridis* larvae) had a similar mortality whether the insecticide was present or not. These results support our hypothesis that the outcome of the IGP would not change when *C. maculata* was the IG predator because it is less affected by novaluron.

Aphids prefer young shoots given that this corresponds to the period when they reproduce faster. As our study was done later in the growing season, the shoots had

reached their mature size and the leaves had a thick cuticle, thus the reproduction of aphids was slow. Our observations show that the aphid colonies growth curves were similar between the water treatment and the novaluron treatment (dashed lines and solid lines from the same color). Consequently, novaluron did not impact the reproductive cycle of aphids, and it did not disrupt the biological control of *Aphis* spp. either. Aphid colonies in cages with *H. axyridis* as an IG prey or an IG predator had a negative growth curve with the number of aphids trending towards zero with time. This shows that *H. axyridis* is a great biological control agent against green apple aphids. On the other hand, the growth curve of aphids without predators or with only *C. maculata* stabilized around 100 aphids increasing slightly with time. These results confirm that *H. axyridis* has a higher predation efficiency and a higher voracity than *C. maculata* (Labrie *et al.*, 2006).

In conclusion, this study is the first long-term semi-field study on the combined effects of IGP and an insecticide. This study shows that the differential susceptibility of two competitors to an insecticide can modulate the intensity and symmetry of the IGP between them. It would be interesting to study the impact of novaluron on IGP with other ladybeetle species, to better understand the global impact of novaluron on the assemblage of coccinellids. If other ladybeetles species are less affected by novaluron than *H. axyridis*, it could have a major impact on the assemblage of coccinellids and other aphidophagous species in apple orchards as novaluron could potentially reduce or even shift the dominance of *H. axyridis* in agricultural fields.

3.6 Acknowledgements

Funding of this project was provided by the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food of Quebec through the Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région. We want to thank Jill Vandermeerschen, a professional

statistician at the Université du Québec à Montréal, for her advice in statistical analyses and Marc Fournier for the technical support. We want to thank the anonymous native English speaker who proofread the manuscript.

3.7 References cited

- Bahlai, C. A., Colunga-Garcia, M., Gage, S. & Landis, D. (2014). The role of exotic ladybeetles in the decline of native ladybeetle populations: evidence from long-term monitoring. *Biological Invasions*, *17*(4), 1005-1024. doi: 10.1007/s10530-014-0772-4
- Beers, E. H., Horton, D. R. & Miliczky, E. (2016). Pesticides used against *Cydia pomonella* disrupt biological control of secondary pests of apple. *Biological Control*, *102*, 35-43. doi: 10.1016/j.biocontrol.2016.05.009
- Brown, P. M. J. & Roy, H. E. (2018). Native ladybird decline caused by the invasive harlequin ladybird *Harmonia axyridis*: evidence from a long-term field study. *Insect Conservation and Diversity*, *11*(3), 230-239. doi: 10.1111/icad.12266
- Cabrera, P., Cormier, D., Bessette, M., Cruz, V. et Lucas, É. (2021). When the adaptive value of intraguild predation between an indigenous and an invasive ladybeetle is altered by an insecticide. *Journal of Pest Science*, (0123456789). doi: 10.1007/s10340-021-01404-0
- Cabrera, P., Cormier, D., Fournier, M. & Lucas, É. (2014). Lethal effects of two reduced risk insecticides on *Harmonia axyridis* and *Coleomegilla maculata* (Col. Coccinellidae) following two routes of exposure. *Pesticides and Beneficial Organisms*, *103*, 41-45.
- Cabrera, P., Cormier, D. & 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. doi: 10.1111/jen.12391
- Cabrera, P., Cormier, D. & 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. doi: 10.1007/s10340-018-0978-9
- Castro-Guedes, C. F. de, Almeida, L. M. de & Moura, M. O. (2020). Asymmetric intraguild predation of *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773) (Coleoptera:

- Coccinellidae) on a native Coccinellidae guild. *Revista Brasileira de Entomologia*, 64(1), 1-7. doi: 10.1590/1806-9665-rbent-2019-69
- Cordeiro, E. M. G., Corrêa, A. S. & Guedes, R. N. C. (2014). Insecticide-mediated shift in ecological dominance between two competing species of grain beetles. *PLoS ONE*, 9(6), e100990. doi: 10.1371/journal.pone.0100990
- Cottrell, T. E. (2004). Suitability of exotic and native lady beetle eggs (Coleoptera: Coccinellidae) for development of lady beetle larvae. *Biological Control*, 31(3), 362-371. doi: 10.1016/j.biocontrol.2004.06.004
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. John Wiley and Sons Inc. New York, USA.
- Cutler, G. C. & Scott-Dupree, C. D. (2007). Novaluron : prospects and limitations in insect pest management. *Pest Technology*, 1(1), 38-46.
- De Armas, F. S., Dionei Grutzmacher, A., Edson Nava, D., Antonio Pasini, R., Rakes, M. & de Bastos Pazini, J. (2020). Non-target toxicity of nine agrochemicals toward larvae and adults of two generalist predators active in peach orchards. *Ecotoxicology*, 29(3), 327-339. doi: 10.1007/s10646-020-02177-5
- Desneux, N., Decourtye, A. & Delpuech, J. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52(1), 81-106. doi: 10.1146/annurev.ento.52.110405.091440
- Dutcher, J. D. (2007). A review of resurgence and replacement causing pest outbreak in IPM. In *General concepts in integrated pest and disease management* (p. 27-43). Springer, Dordrecht.
- Evans, E. W. (2004). Habitat displacement of North American ladybirds by an introduced species. *Ecology*, 85(3), 637-647. <https://doi.org/10.1890/03-0230>
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P. & Elsner, M. (2013). Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. *Science*, 341(6147), 752-758. doi: 10.1126/science.1236281
- Fox, J. & Weisberg, S. (2011). *Cox proportional-hazards regression for survival data in R (appendix): An R companion to applied regression* (2nd ed.). Sage, Thousand Oaks, CA. Retrieved from <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion-2E/appendix/Appendix-Cox-Regression.pdf>

- Fréchette, B., Cormier, D., Chouinard, G., Vanoosthuyse, F. & Lucas, É. (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(3), 521-529. doi: 10.14411/eje.2008.069
- Gagnon, A.-È., Heimpel, G. E. & Brodeur, J. (2011). The ubiquity of intraguild predation among predatory arthropods. *PLoS ONE*, 6(11), e28061. doi: 10.1371/journal.pone.0028061
- Goel, M. K., Khanna, P. & Kishore, J. (2010). Understanding survival analysis: Kaplan-Meier estimate. *International Journal of Ayurveda Research*, 1(4), 274-278. doi: 10.4103/0974-7788.76794
- Guedes, R. N. C., Smagghe, G., Stark, J. D. & Desneux, N. (2016). Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annual Review of Entomology*, 61(1), 43-62. doi: 10.1146/annurev-ento-010715-023646
- Hoogendoorn, M. & Heimpel, G. E. (2004). Competitive interactions between an exotic and a native ladybeetle: a field cage study. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 111(1), 19-28. doi: 10.1111/j.0013-8703.2004.00157.x
- Labrie, G., Lucas, É. & 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. doi: 10.1007/s10530-005-3428-6
- Lucas, É. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102(1), 351-364. doi: 10.14411/eje.2005.052
- Lucas, É. (2012). Intraguild interactions. In I. Hodek, H. F. Van Emden et A. Honek (dir.), *Ecology and behaviour of the ladybird beetles (Coccinellidae)* (1st ed., p. 343-374). Blackwell Publishing Ltd. doi: 10.1002/9781118223208.ch7
- Lucas, É. & Maisonhaute, J.-É. (2019). Intraguild predation. In *Encyclopedia of animal behavior* (Choe, J.C, vol. 4, p. 389-399). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.90118-3
- Lucas, É., 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), 737-743. doi: 10.14411/eje.2007.094

- Mirande, L., Desneux, N., Haramboure, M. & 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. doi: 10.1007/s10340-014-0597-z
- Morin, Y. & Chouinard, G. (2014). Les pucerons, Fiche No 78. *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (eds. Chouinard, G. et al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec. Retrieved from <https://reseaupommier.irda.qc.ca/?p=6469>
- Polis, G. A., Myers, C. A. & Holt, R. D. (1989). The ecology and evolution of intraguild predation: potential competitors that eat each other. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 297-330. doi: 10.1146/annurev.es.20.110189.001501
- Provost, C., Coderre, D., Lucas, É., Chouinard, G. & Bostanian, N. J. (2003). Impact d'une dose sublétale de lambda-cyhalothrine sur les prédateurs intraguilides d'acariens phytophages en vergers de pommiers. *Phytoprotection*, 84(2), 105-113. doi: 10.7202/007813ar
- Schmuck, R., Tornier, I., Bock, K.-D., Waltersdorfer, A. & Künast, C. (1997). A semi-field testing procedure using the ladybird beetle, *Coccinella septempunctata* L. (Col., Coccinellidae), for assessing the effects of pesticides on non-target leaf-dwelling insects under field exposure conditions. *Journal of Applied Entomology*, 121(1-5), 111-120. doi: 10.1111/j.1439-0418.1997.tb01380.x
- Schowalter, T. D. (2011). *Insect ecology: an ecosystem approach* (3rd Edition).
- Stoeckli, S., Mody, K. & Dorn, S. (2008). *Aphis pomi* population development, shoot characteristics, and antibiosis resistance in different apple genotypes. *Journal of economic entomology*, 101(4), 391-398. doi: 10.1603/0022-0493(2008)101
- Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: a discussion of the differences between the Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC). *Psychological methods*, 17(2), 228-243. doi: 10.1037/a0027127

CHAPITRE IV

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les objectifs principaux de ce projet de recherche étaient 1) de tester l'effet de deux insecticides dits à risque réduit, le novaluron et le chlorantraniliprole sur i) l'abondance et la diversité de la guildes des aphidiphages en verger de pommier, ii) le contrôle naturel des pucerons verts, et 2) de tester i) la toxicité du novaluron pour les larves de deux prédateurs aphidiphages majeurs, la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée, ii) l'effet combiné du novaluron et de la prédation intragilde sur la survie des larves de coccinelles.

Les insecticides peuvent avoir des répercussions non voulues à l'échelle des individus, des populations, des communautés et des écosystèmes (Guedes *et al.*, 2016). Cette étude réalisée en conditions de terrain a permis d'approfondir nos connaissances sur l'impact du novaluron et du chlorantraniliprole à l'échelle d'une communauté dans le chapitre deux, et à l'échelle individuelle dans le chapitre trois. La première expérience a révélé que le chlorantraniliprole n'affecte ni l'abondance, ni la diversité de la guildes aphidiphage, contrairement au novaluron qui a été nocif pour un des prédateurs les plus abondants, la punaise miride *Pilophorus perplexus*. L'hypothèse 1.1 que la présence de novaluron et de chlorantraniliprole résulterait en une perte d'abondance et de diversité de la guildes des prédateurs aphidiphages n'a donc pas été validée. L'hypothèse 1.2 que

le traitement au novaluron résulterait en une perte d'abondance et de diversité de la guilde des prédateurs aphidiphages plus importante que le chlorantraniliprole n'a pas été validée. Le contrôle naturel du puceron n'a pas été affecté par les insecticides. Après trois semaines, le nombre de pucerons a considérablement diminué ou les colonies ont totalement disparu dans les trois traitements. La diminution du nombre de pucerons peut être associée à de la prédation ou à des facteurs démographiques comme une baisse naturelle du taux de natalité (OMAFRA, 2009). Les hypothèses 2.1 et 2.2 énonçant que la présence de novaluron et de chlorantraniliprole résulterait en un contrôle naturel du puceron vert du pommier moins efficace et que les colonies de pucerons mettraient plus de temps à disparaître en présence de novaluron qu'en présence de chlorantraniliprole n'ont pas été validées. Le nombre de pucerons et le temps de disparition des colonies de pucerons sont comparables entre les trois traitements. Nos analyses statistiques ont cependant révélé que le nombre de pucerons au cours du temps avait une relation linéaire pour les traitements témoin et novaluron, alors que la relation était quadratique pour le chlorantraniliprole, indiquant qu'au début de l'échantillonnage, le nombre de pucerons était stable, puis a diminué plus rapidement après quelques jours. Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si cette différence significative est due à l'insecticide ou à d'autres facteurs indépendants. Globalement, nos résultats montrent que le chlorantraniliprole et le novaluron sont compatibles avec le contrôle naturel du puceron vert du pommier.

Les insecticides peuvent avoir des répercussions sur les individus d'une même espèce et sur les relations interspécifiques (Guedes *et al.*, 2016). Le chapitre trois a permis d'approfondir nos connaissances quant à l'impact du novaluron sur la survie des larves de coccinelles et sur la prédation intraguilde entre deux espèces aphidiphages en verger. Nos résultats ont révélé que le novaluron est toxique pour les larves de coccinelles asiatiques et maculées de premier stade après une exposition prolongée à des résidus et des proies contaminées. L'hypothèse 3 qu'en présence de novaluron, les larves de coccinelle maculée de premier stade survivraient davantage que celles de la coccinelle

asiatique n'a pas été validée. Le novaluron a causé 80 % de mortalité chez la coccinelle maculée et 87 % chez la coccinelle asiatique après dix jours. L'hypothèse 3 est basée sur les résultats obtenus en laboratoire par Cabrera *et al.* (2017) où les larves de coccinelles maculées n'étaient pas sensibles par les proies contaminées au novaluron. Dans nos essais, les larves de coccinelles étaient exposées au novaluron par la consommation de proies contaminées et par contact avec les résidus d'insecticide sur les surfaces pendant dix jours consécutifs. Il est possible que la mortalité élevée des larves soit due aux mécanismes de détoxification devenus inefficaces à cause du contact prolongé par plusieurs différentes voies de contamination à la matière active du novaluron (Schowalter, 2011). L'hypothèse 4.1 selon laquelle les proies intraguilides survivraient davantage en présence de novaluron que dans le témoin quand la coccinelle asiatique est le prédateur intraguilde a été validée. En étant toxique pour les larves de coccinelles asiatiques, le novaluron a permis aux proies intraguilides de survivre davantage. C'est la première démonstration de la régulation d'une interaction de type prédation intraguilde par l'intermédiaire d'un pesticide. Le traitement pesticide fournit un refuge pour la proie intraguilde contre son prédateur. L'hypothèse 4.2 que les proies intraguilides survivraient autant en présence de novaluron que dans le témoin quand la coccinelle maculée est le prédateur intraguilde a été validée. Les courbes de survie des proies intraguilides de la coccinelle maculée ne différaient pas entre le traitement témoin et le novaluron. Ces résultats montrent que le novaluron influence la symétrie et l'intensité de la prédation intraguilde entre la coccinelle asiatique et la coccinelle maculée. La prédation intraguilde étant un facteur important à la dominance de la coccinelle asiatique sur ses compétiteurs, le novaluron pourrait diminuer la dominance de la coccinelle asiatique dans les vergers, à condition que ses compétiteurs soient moins affectés par le novaluron que cette dernière. Les facteurs environnementaux peuvent influencer la symétrie de la prédation intraguilde entre une espèce indigène et une espèce envahissante. Il n'y a pas d'études connues avec les insectes, mais dans le cas du crabe, Rogers *et al.* (2018) ont montré que la température de l'eau influence la direction de la prédation intraguilde entre le crabe vert *Carcinus*

maenas (L.) (Decapoda : Carcinidae), une espèce envahissante sur la côte est américaine et le crabe bleu *Callinectes sapidus* Rathbun (Decapoda : Portunoidea), une espèce native de l'océan Atlantique. Dans l'eau à basse température, la prédation intragilde était asymétrique en faveur du crabe vert. En revanche, quand l'eau est chaude, la direction de la prédation intragilde change et l'espèce indigène est capable d'exclure les crabes verts envahissants. Ces résultats montrent qu'un facteur extérieur, comme la température, peut moduler la dominance des compétiteurs intragildes, et que ces facteurs extérieurs influencent la répartition des deux compétiteurs dans l'espace.

En ayant des répercussions à plusieurs échelles, les insecticides peuvent façonner la guildes et conséquemment les services écosystémiques fournis par cette guildes. Lorsqu'un habitat est perturbé, les fonctions écosystémiques sont conservées lorsqu'il y a une forte diversité fonctionnelle parce que même si certaines espèces disparaissent, d'autres espèces du même groupe fonctionnel compensent (Liere *et al.*, 2017 ; Philpott *et al.*, 2012). Une guildes aphidiphage diversifiée comprend de la redondance fonctionnelle, donc le processus global du contrôle naturel reste efficace malgré la disparition de quelques individus/espèces aphidiphages (Liere *et al.*, 2017). Dans notre étude, le novaluron s'est révélé toxique pour les larves de coccinelles et de *P. perplexus*, mais le contrôle naturel des pucerons verts n'a pas été perturbé car les autres espèces aphidiphages ont continué à s'attaquer aux pucerons. Nous avons isolé l'impact du novaluron et du chlorantraniliprole en ne pulvérisant aucun insecticide ou acaricide pendant la saison d'échantillonnage. En moyenne, cinq insecticides et dix fongicides sont pulvérisés dans les vergers chaque année (Bradshaw et Hazelrigg, 2018) et on ignore si ces autres produits phytosanitaires pourraient être toxiques pour les espèces aphidiphages résistantes au novaluron et chlorantraniliprole. Notre étude se concentrait sur le contrôle naturel des pucerons verts, mais plusieurs des prédateurs aphidiphages observés sont des espèces généralistes qui contrôlent d'autres ravageurs comme les acariens, les cicadelles ou les cochenilles (**Tableau 1.2**). L'absence de *P. perplexus*

dans les traitements au novaluron n'a pas eu de répercussions sur le contrôle des pucerons verts, mais elle a peut-être eu des répercussions sur les populations d'autres espèces de pucerons ou ses autres proies possibles comme les acariens ou les cicadelles (Niemczyk, 1999). C'est pour cette raison que d'autres études sont nécessaires pour étudier l'importance écologique de *P. perplexus* dans les vergers, mais aussi l'impact d'autres insecticides et la combinaison de plusieurs produits phytosanitaires au cours des saisons sur la guildes des ennemis naturels. Il est primordial d'étudier les effets cumulatifs des insecticides d'une saison à l'autre afin d'évaluer les impacts à long termes sur les ennemis naturels, qui peuvent disparaître des vergers comme la punaise translucide *Hyaliodes vitripennis* après l'utilisation de insecticides de synthèse à large spectre (Firlej *et al.*, 2003).

Parmi les sept insecticides actuellement recommandés en PFI contre le carpocapse de la pomme (**Tableau 1.3**), plusieurs risquent de ne plus être utilisés dans les années à venir. Deux d'entre eux, l'acétamipride (Assail) et le thiaclopride (Calypso) font partie de la famille des néonicotinoïdes, or l'ARLA abandonne progressivement l'homologation des néonicotinoïdes à cause de leur toxicité pour les abeilles domestiques. Récemment, l'ARLA a décidé d'abandonner l'utilisation de trois néonicotinoïdes, l'imidaclopride (Admire), le thiaméthoxame (Actara) et la clothianidine (Clutch) d'ici avril 2021 (Réseau Pommier, 2021). Plusieurs populations de carpocapses au Québec sont résistantes aux organophosphorés comme le phosmet (Imidan) et il pourrait y avoir une résistance croisée avec le méthoxyfénoside (Intrepid) (Grigg-McGuffin *et al.*, 2015 ; Morin *et al.*, 2020). Par conséquent, il est primordial de poursuivre les études sur les moyens de lutte contre le carpocapse de la pomme alternatifs aux insecticides mais aussi de formuler de nouveaux insecticides sélectifs avec des modes d'actions différents (Boivin *et al.*, 2001). La confusion sexuelle, les filets à exclusion, les lâchers d'insectes stériles et de parasitoïdes, l'utilisation de virus et le piégeage de masse sont des stratégies de contrôle qui permettent de réduire l'utilisation d'insecticides et des risques qui leur sont associés (Chouinard *et al.*, 2016 ;

Jaffe *et al.*, 2018). Une diminution de l'utilisation de pesticides serait également favorable aux consommateurs qui sont de plus en plus soucieux de l'origine et des conditions de production de leur alimentation, particulièrement avec la médiatisation des enjeux liés à la toxicité des produits phytosanitaires avec les herbicides à base de glyphosate et les insecticides néonicotinoïdes renommés « pesticides tueurs d'abeilles » (Agence QMI, 2019 ; Agence QMI et Agence AFP, 2019).

Il est important de continuer la recherche sur la biologie des plantes hôtes, des ravageurs et des ennemis naturels dans les cultures (Castex *et al.*, 2018). Le réchauffement climatique va amener des changements de températures, de précipitation et de concentrations de CO₂ dans l'atmosphère qui vont à leur tour influencer la phénologie, la physiologie des individus et altérer la dynamique des populations. Avec l'augmentation des températures, le nombre de générations par année va augmenter, y compris ceux des ravageurs comme le carpocapse de la pomme (Stoeckli *et al.*, 2012). Les changements de développement des arthropodes pourraient bouleverser le synchronisme des ravageurs et de leurs ennemis naturels et augmenter la dépendance aux produits phytosanitaires pour réguler les populations de ravageurs. La compréhension de la physiologie et des interactions entre les plantes, les ravageurs et insectes bénéfiques est primordiale afin d'optimiser la PFI dans le futur.

RÉFÉRENCES

- AAC. (2019). *Profil de la culture de la pomme au Canada, 2016*. Récupéré de <http://www.publications.gc.ca/site/fra/9.867686/publication.html>
- ADAMA. (2018). *Etiquette rimon*. Récupéré de https://www.uap.ca/francais/products/documents/Rimon_Flabel.pdf
- Agence QMI. (2019). Ottawa interdit l'usage de certains pesticides « tueurs d'abeilles ». *TVA Nouvelles*. Récupéré de <https://www.tvanouvelles.ca/2019/04/11/ottawa-interdit-lusage-de-certains-pesticides-tueurs-dabeilles-1>
- Agence QMI et Agence AFP. (2019). Interdiction du glyphosate : Québec ne se prononce pas. *TVA Nouvelles*. Récupéré de <https://www.tvanouvelles.ca/2019/07/03/interdiction-du-glyphosate-quebec-ne-se-prononce-pas>
- Agropomme. (2019). *La confusion sexuelle: Méthode de lutte alternative aux pesticides contre le carpocapse de la pomme*. Bulletin technique: Confusion sexuelle du carpocapse de la pomme. Récupéré de [http://www.agropomme.ca/Documentation_publicue/BULLETINS TECHNIQUES/Confusion_sexuelle_du_carpocapse.pdf](http://www.agropomme.ca/Documentation_publicue/BULLETINS_TECHNIQUES/Confusion_sexuelle_du_carpocapse.pdf)
- Alston, D. G. (2003). Evaluation of new insecticides for control of green and wooly apple aphids in apple. Dans *Proceedings of the 77th Annual Western Orchard Pest & Disease Management Conference*.
- Amarasekare, K. G. et 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. doi: 10.1603/EC12483
- Antiqueira, P. A. P., de Omena, P. M., Gonçalves-Souza, T., Vieira, C., Migliorini, G. H., Kersch-Becker, M. F., et Romero, G. Q. (2020). Precipitation and predation risk alter the diversity and behavior of pollinators and reduce plant fitness. *Oecologia*, 192(3), 745-753. doi: 10.1007/s00442-020-04612-0

- ARLA. (2013). *Fiche technique sur La réglementation des pesticides au Canada*. Récupéré de <http://publications.gc.ca/collections/Collection/H113-2-2-1999F.pdf>
- Ayyanath, M. M., Cutler, G. C., Scott-Dupree, C. D. et Sibley, P. K. (2013). Transgenerational shifts in reproduction hormones in green peach aphid exposed to low concentrations of imidacloprid. *PLoS ONE*, 8(9), 1-9. doi: 10.1371/journal.pone.0074532
- Bahlai, C. A., Colunga-Garcia, M., Gage, S. et Landis, D. (2014). The role of exotic ladybeetles in the decline of native ladybeetle populations : evidence from long-term monitoring. *Biological Invasions*, 17(4), 1005-1024. doi: 10.1007/s10530-014-0772-4
- Baker, A. C. et Turner, W. F. (1916). Morphology and biology of the green apple aphid. *Journal of agricultural research*, 5(21), 955-993.
- Barbosa, R. R., Torres, J. B. et Rodrigues, A. R. S. (2017). High concentrations of chlorantraniliprole reduce its compatibility with a key predator, *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Economic Entomology*, 110(5), 2039-2045. doi: 10.1093/jee/tox217
- 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. doi: 10.1016/j.biocontrol.2016.05.009
- 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. doi: 10.1016/j.biocontrol.2016.04.010
- Benelli, G., Lucchi, A., Thomson, D. et Ioriatti, C. (2019). Sex pheromone aerosol devices for mating disruption: Challenges for a brighter future. *Insects*, 10(10), 1-16. doi: 10.3390/insects10100308
- Blackman, R. L. et Eastop, V. F. (2000). *Aphids on the world's crops: an identification and information guide*. (Ed. 2). (s. 1.) : John Wiley & Sons Ltd.
- Boivin, T., Chabert d'Hières, C., Bouvier, J. C., Beslay, D. et Sauphanor, B. (2001). Insecticide resistance in the codling moth (*Cydia pomonella*). *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 99, 381-386. doi: 10.1177/0149206313478184

- Bradshaw, T. L. et Hazelrigg, A. (2018). Status of IPM practice adoption in Vermont apple orchards. *College of agriculture and life sciences faculty publications*, (28), 1-29. Récupéré de <https://scholarworks.uvm.edu/calsfac/28>
- Brown, M. (1999). Temporal changes in the aphid predator guild in eastern North America. *IOBC-WPRS Bulletin*, 22(6), 7-11.
- Brugger, K. E., Cole, P. G., Newman, I. C., Parker, N., Scholz, B., Suvagia, P. et Hammond, T. G. (2010). Selectivity of chlorantraniliprole to parasitoid wasps. *Pest Management Science*, 66, 1075-1081. doi: 10.1002/ps.1977
- Cabrera, P., Cormier, D., Bessette, M., Cruz, V. et Lucas, É. (2021). When the adaptive value of intraguild predation between an indigenous and an invasive ladybeetle is altered by an insecticide. *Journal of Pest Science*, (0123456789). doi: 10.1007/s10340-021-01404-0
- 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. *Pesticides and Beneficial Organisms*, 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. doi: 10.1111/jen.12391
- 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(3), 1153-1164. doi: 10.1007/s10340-018-0978-9
- Cartier, L. (2015). Economic benefits of using sterile insect technique and mating disruption to control codling moth. *Journal of Agricultural Science*, 7(9), 14-25. doi: 10.5539/jas.v7n9p14
- Castex, V., Beniston, M., Calanca, P., Fleury, D. et Moreau, J. (2018). Pest management under climate change: The importance of understanding tritrophic relations. *Science of The Total Environment*, 616-617, 397-407. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.027
- Castro-Guedes, C. F. de, Almeida, L. M. de et Moura, M. O. (2020). Asymmetric intraguild predation of *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773) (Coleoptera: Coccinellidae) on a native Coccinellidae guild. *Revista Brasileira de Entomologia*, 64(1), 1-7. doi: 10.1590/1806-9665-rbent-2019-69

- CETAB. (2016). *Évaluation de filets monoparcelle pour la protection des pommiers contre les insectes ravageurs sans utilisation d'insecticides*. Récupéré de https://cetab.bio/wp-content/uploads/2016/09/cetab_filet_monoparcelle_en_verger_de_pommiers_bio_rapport_final.pdf
- Chambers, R. J. (1988). Syrphidae. Dans *Aphids. Their biology, natural enemies and control* (p. 259-270). (s. 1.) : Elsevier, Amsterdam.
- Charbonneau, A., Vanoosthuysse, F., Chouinard, G. et Cormier, D. (2017). Des gains environnementaux à utiliser la confusion sexuelle contre le carpocapse de la pomme. Dans *Réunion annuelle société d'entomologie du Québec, Longueuil*.
- Chomnunti, P., Hongsanan, S., Aguirre-Hudson, B., Tian, Q., Peršoh, D., Dhami, M. K., et Hyde, K. D. (2014). The sooty moulds. *Fungal Diversity*, 66(1), 1-36. doi: 10.1007/s13225-014-0278-5
- 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*. Récupéré de https://irda.blob.core.windows.net/media/2033/chouinard-bellerose-2017_fiche_classification_pesticides_pfi.pdf
- Chouinard, G., Firlej, A. et Cormier, D. (2016). Going beyond sprays and killing agents: Exclusion, sterilization and disruption for insect pest control in pome and stone fruit orchards. *Scientia Horticulturae*, 208, 13-27. doi: 10.1016/j.scienta.2016.03.014
- Chouinard, G., Morin, Y., Cormier, D. et Maheux, R. (2020). Description et efficacité des prédateurs de pucerons, Fiche No 97. *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (eds. Chouinard, G. et al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec.
- Chouinard, G., Phillion, V. et Bellerose, S. (2021). Répertoire des principaux organismes nuisibles en verger, Fiche No 10. *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (eds. Chouinard, G. et al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec.
- Chouinard, G., Veilleux, J., Pelletier, F., Larose, M., Phillion, V., Joubert, V. et Cormier, D. (2019). Impact of exclusion netting row covers on 'honeycrisp' apple trees grown under northeastern North American conditions: Effects on photosynthesis and fruit quality. *Insects*, 10(7), 1-17. doi: 10.3390/insects10070214

- 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. doi: 10.4039/Ent127609-4
- Cordeiro, E. M. G., Corrêa, A. S. et Guedes, R. N. C. (2014). Insecticide-mediated shift in ecological dominance between two competing species of grain beetles. *PLoS ONE*, 9(6), e100990. doi: 10.1371/journal.pone.0100990
- Cordova, D., Benner, E. A., Sacher, M. D., Rauh, J. J., Sopa, J. S., Lahm, G. P., et 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. doi: 10.1016/j.pestbp.2005.07.005
- Cormier, D., Cabrera, P., Fournier, M., Vanoosthuyse, F. 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., Charbonneau, A., Vanoosthuyse, F. et Belzile, L. (2019). Utilisation à grande échelle de la confusion sexuelle contre le carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*) dans les vergers québécois. (*Rapport final – Programme Prime-Vert, volet 3.2 – Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise*). Récupéré de https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-2015-004_Fiche.pdf
- CRAAQ. (2000). *Guide d'identification des ravageurs du pommier et de leurs ennemis naturels*. (s. l. : n. é.).
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod biological control agents and pesticides*. (s. l.) : John Wiley and Sons Inc. New York, USA.
- 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, 196-204. doi: 10.1016/j.biocontrol.2005.12.016
- Decourtye, A., Henry, M. et Desneux, N. (2013). Overhaul pesticide testing on bees. *Nature*, 497(7448), 188. doi: 10.1038/497188a
- Despre, L., David, J. et Gallet, C. (2007). The evolutionary ecology of insect resistance to plant chemicals. *Ecology and evolution*, 22(6), 298-307. doi: 10.1016/j.tree.2007.02.010

- Dib, H., Jamont, M., Sauphanor, B. et Capowiez, Y. (2011). Predation potency and intraguild interactions between generalist (*Forficula auricularia*) and specialist (*Episyrphus balteatus*) predators of the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*). *Biological Control*, 59(2), 90-97. doi: 10.1016/j.biocontrol.2011.07.012
- Dinter, A., Brugger, K., Bassi, A., Frost, N. et 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. *Pesticides and Beneficial Organisms*, 35, 128-135.
- Dixon, A. F. G. (2009). The escape responses shown by certain aphids to the presence of the coccinellid *Adalia decempunctata* (L.). *Transactions of the Royal Entomological Society of London*, 110(11), 319-334. doi: 10.1111/j.1365-2311.1958.tb00786.x
- Duke, S. O. (2018). Interaction of chemical pesticides and their formulation ingredients with microbes associated with plants and plant pests. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(29), 7553-7561. doi: 10.1021/acs.jafc.8b02316
- Dutcher, J. D. (2007). A review of resurgence and replacement causing pest outbreak in IPM. Dans *General concepts in integrated pest and disease management* (p. 27-43). (s. l.) : Springer, Dordrecht.
- El-Wakeil, N. et Gaafar, N. (2020). Predacious insects and their efficiency in suppressing insect pests. Dans *Cottage industry of biocontrol agents and their applications* (p. 133-155). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-33161-0_4
- EPA. (2020). *Conventional reduced risk pesticide program*. Récupéré de <https://www.epa.gov/pesticide-registration/conventional-reduced-risk-pesticide-program>
- Evans, E. W. (2004). Laboratory-based toxicological assessments of new insecticides on mortality and fecundity of *Neoseiulus fallacis* (Acari: Phytoseiidae). *Ecology*, 85(3), 637-647. doi: 10.1890/03-0230
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P. et Elsner, M. (2013). Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities. *Science*, 341(6147), 752-758. doi: 10.1126/science.1236281

- Ferran, A. et Dixon, A. F. G. (1993). Foraging behaviour of ladybird larvae (Coleoptera: Coccinellidae). *European Journal of Entomology*, 90(4), 383-402.
- Finke, D. L. et Snyder, W. E. (2008). Niche partitioning increases resource exploitation by diverse communities. *Science*, 321(5895), 1488-1490. doi: 10.1126/science.1160854
- Firlej, A., Chouinard, G., Morin, Y., Cormier, D. et Coderre, D. (2003). Établissement et dispersion du prédateur *Hyaliodes vitripennis* (Hemiptera : Miridae) suite à des introductions dans une pommeraie commerciale au Québec. *Phytoprotection*, 84(2), 93-103. doi: 10.7202/007812ar
- FMC Corporation. (2017). *Étiquette altacor*. Récupéré de <https://ag.fmc.com/ca/fr/insecticides/insecticide-altacor>
- Fraser, R. L. (1988). McIntosh, John (b. 1777, d. 1845 or 1846). Dans *Dictionary of Canadian Biography* (vol. 7). University of Toronto/Université Laval. Récupéré le 17 janvier 2021 de http://www.biographi.ca/en/bio/mcintosh_john_7E.html
- Fréchette, B., Cormier, D., Chouinard, G., Vanoosthuyse, F. et Lucas, É. (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(3), 521-529. doi: 10.14411/eje.2008.069
- Gagnon, A.-È., Heimpel, G. E. et Brodeur, J. (2011). The ubiquity of intraguild predation among predatory arthropods. *PLoS ONE*, 6(11), e28061. doi: 10.1371/journal.pone.0028061
- Getanjaly, V. L. R., Sharma, P. et Kushwaha, R. (2015). Beneficial insects and their value to agriculture. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences*, 3(5), 25-30. Récupéré de www.isca.me
- Gouvernement du Canada. (2004). *Procédure d'homologation de pesticide*. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/pesticides-lutte-antiparasitaire/public/proteger-votre-sante-environnement/procedure-homologation-pesticide.html>
- Grigg-McGuffin, K., Scott, I. M., Bellerose, S., Chouinard, G., Cormier, D. et Scott-Dupree, C. (2015). Susceptibility in field populations of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), in Ontario and Quebec apple

- orchards to a selection of insecticides. *Pest Management Science*, 71(2), 234-242. doi: 10.1002/ps.3787
- Guedes, R. N. C. et Cutler, G. (2014). Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. *Pest Management Science*, 70(1), 690-697. doi: 10.1002/ps.3669
- Guedes, R. N. C., Smagghe, G., Stark, J. D. et Desneux, N. (2016). Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annual Review of Entomology*, 61(1), 43-62. doi: 10.1146/annurev-ento-010715-023646
- Guénard, B., Dumont, F., Fréchette, B., Francoeur, A. et Lucas, É. (2018). May furtive predation provide enemy free space in ant-tended aphid colonies? *PLoS ONE*, 13(10), e0204019. doi: 10.1371/journal.pone.0204019
- Hamilton, G. C., Swift, F. C. et Marini, R. (1986). Effect of *Aphis pomi* (Homoptera: Aphididae) density on apples. *Journal of Economic Entomology*, 79(2), 471-478. doi: 10.1093/jee/79.2.471
- 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. doi: 10.1016/0261-2194(95)91106-P
- Harmon, J. P., Losey, J. E. et Ives, A. R. (1998). The role of vision and color in the close proximity foraging behavior of four coccinellid species. *Oecologia*, 115(1-2), 287-292. doi: 10.1007/s004420050518
- Hautier, L., Grégoire, J. C., De Schauwers, J., Martin, G. S., 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. doi: 10.1007/s00049-008-0405-4
- Hodek, I. et Honek, A. (1996). *The Ecology of Coccinellidae*. (s. l.) : Kluwer, Boston, MA.
- Hoogendoorn, M. et Heimpel, G. E. (2004). Competitive interactions between an exotic and a native ladybeetle: a field cage study. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 111(1), 19-28. doi: 10.1111/j.0013-8703.2004.00157.x
- Horner, R. M., Lo, P. L., Rogers, D. J., Walker, J. T. S. et Suckling, D. M. (2020). Combined effects of mating disruption, insecticides, and the sterile insect technique on *Cydia pomonella* in New Zealand. *Insects*, 11(12), 1-23. doi: 10.3390/insects11120837

- Iablokoff-Khuzorian, S. M. (1982). *Les coccinelles: coléoptères-coccinellidae*: (Édition Bo). (s. l. : n. é.).
- IRAC. (2018). *IRAC mode of action classification scheme*. Récupéré de <https://www.iraconline.org/documents/moa-classification/?ext=pdf>
- IRDA. (2019). *Production fruitière intégrée 2019*. Récupéré de <https://www.agrireseau.net/reseaupommier/documents/99801/affiche-production-fruitiere-integree-pfi-2019>
- 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. doi: 10.1002/arch.10113
- ISQ. (2020). *Faits saillants de l'enquête sur la mise en marché de la pomme au Québec*. Récupéré de <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/faits-saillants-de-lenquete-sur-la-mise-en-marche-de-la-pomme-au-quebec-recolte-2018.pdf>
- Jaffe, B. D., Guédot, C. et Landolt, P. J. (2018). Mass-trapping codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae), using a kairomone lure reduces fruit damage in commercial apple orchards. *Journal of Economic Entomology*, 111(4), 1983-1986. doi: 10.1093/jee/toy111
- Joao Zotti, M., Dionel Grutzmacher, A., Heres Lopes, I. 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. doi: 10.1111/1744-7917.12008
- Kaakeh, W., Pfeiffer, D. G. et Marini, R. P. (1993). Effect of *Aphis spiraecola* and *A. pomi* (Homoptera: Aphididae) on the growth of young apple trees. *Crop Protection*, 12(2), 141-147. doi: 10.1016/0261-2194(93)90141-5
- 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(1), 16. doi: 10.1093/jis/3.1.32
- Labrie, G., Lucas, É. 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. doi: 10.1007/s10530-005-3428-6
- Liere, H., Jha, S. et Philpott, S. M. (2017). Intersection between biodiversity conservation, agroecology, and ecosystem services. *Agroecology and*

Sustainable Food Systems, 41(7), 723-760. doi:
10.1080/21683565.2017.1330796

- Lorenzetti, F., Arnason, J. T., Philogène, B. J. R. et Hamilton, R. I. (1997). Evidence for spatial niche partitioning in predaceous aphidophaga: Use of plant colour as a cue. *Entomophaga*, 42(1-2), 49-56. doi: 10.1007/BF02769879
- Losey, J. E. et Denno, R. F. (1998). Positive predator-predator interactions: enhanced predation rates and synergistic suppression of aphid populations. *Ecology*, 79(6), 2143-2152. doi: 10.1890/0012-9658(1998)079[2143:PPPIEP]2.0.CO;2
- Losey, J. E. et Vaughan, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *BioScience*, 56(4), 311-323. doi: 10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2
- Lucas, É. (2005). Intraguild predation among aphidophagous predators. *European Journal of Entomology*, 102(1), 351-364. doi: 10.14411/eje.2005.052
- Lucas, É. (2012). Intraguild Interactions. Dans I. Hodek, H. F. Van Emden et A. Honek (dir.), *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae)* (1st éd., p. 343-374). (s. l.) : Blackwell Publishing Ltd. doi: 10.1002/9781118223208.ch7
- Lucas, É. et Brodeur, J. (2001). A fox in sheep's clothing: Furtive predators benefit from the communal defense of their prey. *Ecology*, 82(11), 3246. doi: 10.2307/2679847
- Lucas, É., Gagné, 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, 457-463. doi: 10.14411/eje.2002.058
- Lucas, É. et Maisonhaute, J.-É. (2019). Intraguild predation. Dans *Encyclopedia of Animal Behavior* (Choe, J.C, vol. 4, p. 389-399). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.90118-3
- Lucas, É., 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), 737-743. doi: 10.14411/eje.2007.094

- Lundgren, J. G. (2009). Nutritional aspects of non-prey foods in the life histories of predaceous Coccinellidae. *Biological Control*, 51(2), 294-305. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.05.016
- MAPAQ. (s. d.). *Stades-repères du pommier*. Récupéré de <https://www.agrireseau.net/references/8/Karine/outils/Stades-repères du pommier.pdf>
- MAPAQ. (2015). *Monographie de l'industrie de la pomme au Québec*. Récupéré de www.mapaq.gouv.qc.ca/industriepomme
- MAPAQ. (2017). *Programme de modernisation des vergers de pommiers au Québec*. Récupéré de https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Formulaires/modernisation_vergers.pdf
- MAPAQ. (2018). *Programme Prime Vert 2018-2023*. Récupéré de <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Formulaires/ProgrammePrime-Vert2018-2023.pdf>
- 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. doi: 10.1016/j.biocontrol.2015.05.006
- Miñarro, M., Fernandes-Mata, G. et Medina, P. (2010). Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological entomology*, 35, 206-215. doi: 10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x
- Morin, Y. et Chouinard, G. (2020). Les pucerons, Fiche No 78. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (eds. Chouinard, G. et al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec. Récupéré de <https://reseau-pommier.irda.qc.ca/?p=6469>
- Morin, Y., Cormier, D. et Chouinard, G. (2020). Le carpocapse de la pomme, Fiche No 76. Dans *Guide de référence en production fruitière intégrée à l'intention des producteurs de pommes du Québec* (eds. Chouinard, G. et al.). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec. Récupéré de <https://reseau-pommier.irda.qc.ca/?p=6431>
- Morse, J. G. et Croft, B. A. (1987). Biological control of *Aphis pomi* (Hom.: Aphididae) by *Aphidoletes aphidimyza* (Dip.: Cecidomyiidae); a predator-prey model. *Entomophaga*, 32(4), 339-356. doi: 10.1007/BF02372443

- Naylor, R. et Ehrlich, P. R. (1997). Natural pest control services and agriculture. Dans *Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems* (p. 151-174). (s. l. : n. é.).
- Nelson, C., Esch, E., Kimmie, S., Tesche, M., Philip, H. et Arthur, S. (2021). Putting the sterile insect technique into the modern integrated pest management toolbox to control the codling moth in Canada. Dans *Area-Wide Integrated Pest Management*. (p. 111-127). (s. l. : n. é.).
- Niemczyk, E. (1999). Occurrence and effectiveness of some predatory bugs (Heteroptera) in apple orchards. *Bulletin OILB/SROP*, 22(7), 21-29.
- Noriyuki, S. et Osawa, N. (2016). Reproductive interference and niche partitioning in aphidophagous insects. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2016, 1-15. doi: 10.1155/2016/4751280
- Obata, S. (1986). Mechanisms of prey finding in the aphidophagous ladybird beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Entomophaga*, 31(3), 303-311. doi: 10.1007/BF02373340
- OMAFRA. (1998). *Fiche technique: Cultivars de pommiers résistants aux maladies*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/98-014.htm>
- OMAFRA. (2009). Green apple aphid. Dans *Ontario apple IPM*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/IPM/english/apples/insects/green-apple-aphid.html#advanced>
- OMAFRA. (2016a). Le carpocapse de la pomme. Dans *Lutte intégrée contre les ennemis du pommier*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/codling.htm#monitor>
- OMAFRA. (2016b). Puceron vert du pommier. Dans *Lutte intégrée contre les ennemis du pommier*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/greenaph.htm>
- OMAFRA. (2018). *Les porte-greffes de pommiers*. Récupéré de <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-008.htm>
- Pahl, K. B., Yurkowski, D. J., Lees, K. J. et Hussey, N. E. (2020). Measuring the occurrence and strength of intraguild predation in modern food webs. *Food Webs*, 25, e00165. doi: 10.1016/j.fooweb.2020.e00165

- Philpott, S. M., Pardee, G. L. et Gonthier, D. J. (2012). Cryptic biodiversity effects: importance of functional redundancy revealed through addition of food web complexity. *Ecology*, 93(5), 992-1001. doi: 10.1890/11-1431.1
- Pineda, A. et Marcos-García, M. Á. (2008). Seasonal abundance of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae) and their population levels in and outside Mediterranean sweet pepper greenhouses. *Annals of the Entomological Society of America*, 101(2), 384-391. doi: 10.1603/0013-8746(2008)101[384:SAOAH]2.0.CO;2
- Polis, G. A. et Holt, R. D. (1992). Intraguild predation: The dynamics of complex trophic interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 7(5), 151-154. doi: 10.1016/0169-5347(92)90208-S
- 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(1), 297-330. doi: 10.1146/annurev.es.20.110189.001501
- PPQ. (2019). *Rapport Annuel 2019*. Récupéré de <https://producteursdepommesduquebec.ca/wp-content/uploads/2019/12/rapport-annuel-AGA-2019-VF.pdf>
- Provost, C., Coderre, D., Lucas, É., Chouinard, G. et Bostanian, N. J. (2003). Impact d'une dose sublétale de lambda-cyhalothrine sur les prédateurs intraguilles d'acariens phytophages en vergers de pommiers. *Phytoprotection*, 84(2), 10-113. doi: 10.7202/007813ar
- Qu, Y., Xiao, D., Li, J., Chen, Z., Biondi, A., Desneux, N., et Song, D. (2015). Sublethal and hormesis effects of imidacloprid on the soybean aphid *Aphis glycines*. *Ecotoxicology*, 24(3), 479-487. doi: 10.1007/s10646-014-1396-2
- Ramirez, R. A. et Snyder, W. E. (2009). Scared sick? Predator–pathogen facilitation enhances exploitation of a shared resource. *Ecology*, 90(10), 2832-2839. doi: 10.1890/08-1941.1
- Réseau Pommier. (2021). *Projets et décisions de réévaluation de l'ARLA concernant la pomme*. Récupéré de <https://reseaupommier.irda.qc.ca/?p=19528>
- Rogers, T. L., Gouhier, T. C. et Kimbro, D. L. (2018). Temperature dependency of intraguild predation between native and invasive crabs. *Ecology*, 99(4), 885-895. doi: 10.1002/ecy.2157

- Root, R. B. (1967). The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher. *Ecological Monographs*, 37(4), 317-350. doi: 10.2307/1942327
- Rosenheim, J., 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. doi: 10.1006/bcon.1995.1038
- Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C., Holdcraft, R., Mason, K. S. et Isaacs, R. (2014). Relative toxicity and residual activity of insecticides used in blueberry pest management: Mortality of natural enemies. *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 277-285. doi: 10.1603/EC13191
- Roy, H., Brown, P. et Majerus, M. (2006). *Harmonia axyridis*: a successful biocontrol agent or an invasive threat? Dans *An ecological and societal approach to biological control* (p. 295-309). Springer, Dordrecht. Récupéré de https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4401-4_10
- Samuel, O., Dion, S., St-Laurent, L. et April, M. H. (2007). *Indicateur de risque et pesticides du Québec*. Récupéré de <https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/602-IndicateurDeRisqueDesPesticides.pdf>
- Santé Canada. (2007). *Décision d'homologation du novaluron*. Récupéré de https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/cps-spc/alt_formats/pdf/pubs/pest/_decisions/rd2014-10/rd2014-10-fra.pdf
- Santé Canada. (2011). *Décision d'homologation du chlorantraniliprole*. Récupéré de http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/sc-hc/H113-25-2011-2-fra.pdf
- Schmuck, R., Tornier, I., Bock, K.-D., Waltersdorfer, A. et Künast, C. (1997). A semi-field testing procedure using the ladybird beetle, *Coccinella septempunctata* L. (Col., Coccinellidae), for assessing the effects of pesticides on non-target leaf-dwelling insects under field exposure conditions. *Journal of Applied Entomology*, 121(1-5), 111-120. doi: 10.1111/j.1439-0418.1997.tb01380.x
- Schowalter, T. D. (2011). *Insect ecology: An ecosystem approach* (3e Editio). (s. l. : n. é.).
- Stoeckli, S., Hirschi, M., Spirig, C., Calanca, P., Rotach, M. W. et Samietz, J. (2012). Impact of climate change on voltinism and prospective diapause induction of a global pest insect - *Cydia pomonella* (L.). *PLoS ONE*, 7(4). doi: 10.1371/journal.pone.0035723

- Thistlewood, H. M. A. et Judd, G. J. R. (2019). Twenty-five years of research experience with the sterile insect technique and area-wide management of codling moth, *Cydia pomonella* (L.), in Canada. *Insects*, 10(9). doi: 10.3390/insects10090292
- Vilca Mallqui, K. S., Vieira, J. L., Guedes, R. N. C. et Gontijo, L. M. (2014). Azadirachtin-induced hormesis mediating shift in fecundity-longevity trade-off in the Mexican bean weevil (Chrysomelidae: Bruchinae). *Journal of Economic Entomology*, 107(2), 860-866. doi: 10.1603/EC13526
- Vinson, S. B. (1998). The general host selection behavior of parasitoid Hymenoptera and a comparison of initial strategies utilized by larvaphagous and oophagous species. *Biological Control*, 11(2), 79-96. doi: 10.1006/bcon.1997.0601
- Waage, J. K., Greathead, D. J., Brown, R., Paterson, R. R. M., Haskell, P. T., Cook, R. J. et Krishnaiah, K. (1988). Biological control: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 318(1189), 111-128. doi: 10.1098/rstb.1988.0001
- Witzgall, P., Stelinski, L., Gut, L. et Thomson, D. (2008). Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53, 503-522. doi: 10.1146/annurev.ento.53.103106.093323
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K. et Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253-260. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.024