

Rapport final

No projet : IA116618

Lutte biologique à la drosophile à ailes tachetées à l'aide de la complémentarité d'ennemis naturels commerciaux

Responsable scientifique :
Annabelle Firlej, Ph.D., IRDA

Liste des auteurs :
Annabelle Firlej, Ph. D., IRDA
Phanie Bonneau, M. Sc., candidate au doctorat, Université Laval
Elisabeth Ménard, DESS, IRDA
Kim Ostiguy, Tech., IRDA
Valérie Fournier, Ph. D., Université Laval
Justin Renkema, Ph. D., Agriculture et Agroalimentaire Canada

Date de remise
1^{er} décembre 2019

Table des matières

1	Introduction	4
2	Test d'efficacité de prédateurs-parasitoïdes en laboratoire pour lutter contre la DAT	7
2.1	Objectifs	7
2.2	Matériel et méthodes	7
2.2.1	Les colonies d'insectes	7
2.2.2	Expérience d'efficacité des parasitoïdes et prédateurs contre tous les stades de <i>D. suzukii</i>	7
2.2.3	Efficacité des prédateurs contre un seul stade de <i>D. suzukii</i>	8
2.2.4	Analyse des données	8
2.3	Résultats	9
2.3.1	Expérience d'efficacité des parasitoïdes et prédateurs contre tous les stades de <i>D. suzukii</i>	9
2.3.2	Efficacité des prédateurs contre un seul stade de <i>D. suzukii</i>	10
2.3.3	Parasitisme	11
2.4	conclusion	13
3	Susceptibilité des ennemis naturels choisis à différents biopesticides	13
3.1	Objectifs	13
3.2	Matériel et méthodes	13
3.2.1	Les colonies d'insectes	13
3.2.2	Les bioessais	13
3.2.3	Analyses des données	14
3.3	Résultats	14
3.4	Conclusion	16
4	Efficacité d'un agencement d'ennemis naturels en conditions laboratoire et semi-naturelle	16
4.1	Objectif	16
4.2	Matériel et méthodes	17
4.2.1	Les colonies d'insectes	17
4.2.2	Efficacité en laboratoire	17
4.2.3	Efficacité en conditions semi-naturelles sous serres	18
4.2.4	Analyses des données	18
4.3	Résultats	18
4.3.1	Efficacité en laboratoire	18
4.3.2	Efficacité en conditions semi-naturelles sous serres	19
4.4	Conclusion	19
5	Volet 4. Réponse fonctionnelle des ennemis naturels	19
5.1	Objectif	19
5.2	Matériel et méthodes	20
5.2.1	Les colonies d'insectes	20
5.2.2	Réponse à la densité de proies	20
5.3	Résultats	21
5.4	Conclusion	22
6	Stratégie de contrôle de <i>D. suzukii</i> en cage sous conditions semi-naturelles	22
6.1	Objectif	22
6.2	Matériel et méthodes	22
6.2.1	Les colonies d'insectes	22
6.2.2	Évaluation de l'efficacité de trois stratégies de lutte	22
6.2.3	Analyses des données	24
6.3	Résultats	24

6.4	Conclusion	25
7	Conclusion générale	25
8	Références	26

1 INTRODUCTION

La drosophile à ailes tachetées (DAT), *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae), est un ravageur exotique originaire d'Asie (Kanzawa, 1939) observé pour la première fois en 2010 au Québec (ACIA, 2011) et considéré depuis 2013 comme un ravageur majeur des petits-fruits en Amérique du Nord et en Europe. La DAT s'attaque aux petits-fruits cultivés commercialement, la framboise, la mûre, le bleuet, la cerise et la fraise (Lee *et al.* 2011). En 2012, les dommages à la première récolte ont frôlé les 100 % dans certaines cultures au Québec, notamment pour la framboise. Depuis 2012, les populations ont toujours été abondantes et les dommages sont présents même avec l'utilisation de traitements phytosanitaires.

Cini *et al.* (2012) font état d'une longévité de 60 jours et d'une capacité de ponte de 400 œufs pour les femelles, mais la longévité moyenne est plutôt de 26 jours à 25 °C avec en moyenne 68 œufs pondus par femelle en laboratoire (Lin *et al.* 2014). Les œufs éclosent à l'intérieur des 72 heures suivant la ponte, passent par trois stades larvaires successifs et un stade pupal. Contrairement aux autres mouches à fruits, la DAT pond ses œufs dans des fruits en mûrissement proche d'être récoltés et non pas dans des fruits en décomposition tombés au sol. Les dommages occasionnés aux fruits sont dus à la larve qui se nourrit de l'intérieur du fruit et aussi des infections de pathogènes qui s'infiltrent par les cicatrices de ponte. Ce ravageur peut compléter une génération en 8 à 10 jours à 25°C et ainsi de 7 à 15 générations peuvent se succéder en une année selon les conditions climatiques (Cini *et al.* 2012). Les premiers adultes sont habituellement capturés à la mi-juillet au Québec et demeurent présents jusqu'à la fin novembre.

Même si les connaissances s'approfondissent et se raffinent, les méthodes de lutte actuelles contre la DAT reposent essentiellement sur l'application d'insecticides dès la détection des premiers adultes (seuil d'intervention fixé à un adulte), à un stade sensible de la culture. Certaines cultures comme la fraise d'été et le bleuet en corymbe peuvent être épargnées par les infestations de DAT car leur saison de production plus « hâtive » en été précède en grande partie la ponte de la DAT. Par contre, la fraise à jour neutre et la framboise d'automne sont récoltées pendant la période où les populations de DAT sont les plus élevées (août-septembre-début octobre). De ce fait, 7 à 10 traitements insecticides peuvent être réalisés durant la saison de production dans ces cultures (Lacroix, comm. pers.). Il y a neuf insecticides homologués contre la DAT (six matières actives différentes) avec une recommandation d'application aux 7 à 10 jours (SAGÉ Pesticides, 2019). Tous sont toxiques pour les abeilles et certains sont très nocifs pour la faune auxiliaire et les organismes aquatiques (SAGÉ pesticides, 2019). Seul l'insecticide Entrust (spinosad) est actuellement homologué pour les producteurs biologiques avec un maximum de trois applications par saison (CRAAQ, 2019). C'est en framboisières que l'on rapporte le plus grand nombre de traitements phytosanitaires en une saison (jusqu'à 10 pulvérisations successives d'insecticides). Dans ce contexte, l'importance de développer de nouvelles techniques de lutte contre ce ravageur est justifiée et elles doivent permettre une réduction efficace du nombre de traitements phytosanitaires.

Parmi les méthodes alternatives en développement pour lutter contre la DAT, plusieurs sont à l'étude ou ont été prouvées efficaces comme les filets d'exclusion en bleuëtière (Cormier *et al.* 2015), le passage au froid des fruits, l'irradiation (Follett *et al.* 2014), le piégeage de masse (Hampton *et al.* 2014) et l'utilisation de nématodes et champignons entomopathogènes (Cuthbertson *et al.* 2014). Cependant, ces méthodes ne s'adaptent pas à toutes les cultures et ne diminuent pas les populations autant que souhaité. L'utilisation d'ennemis naturels pour la lutte biologique est aussi étudiée par plusieurs équipes en Amérique du Nord et en Europe. Il y a deux grands groupes auxquels nous nous intéresserons: les parasitoïdes et les prédateurs. Voici l'état des connaissances résumé dans un tableau pour les parasitoïdes (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des parasitoïdes s'attaquant à la DAT (Tiré de Firlje et Vanoosthuyse 2017).

Espèces de parasitoïdes	Stade attaqué	Pourcentage d'infestation	Pourcentage d'émergence	Références
<i>Asobara brevicauda</i>	Larve	n.d.	n.d. 67,7 %	Daane <i>et al.</i> 2016 Mitsui et Kimura 2010
<i>Asobara japonica</i>	Larve	91-98 %	41-71 % 67,7 %	Chabert <i>et al.</i> 2012 Mitsui et Kimura 2010
<i>Asobara leverii</i>	Larve	n.d.	n.d.	Daane <i>et al.</i> 2016
<i>Asobara tabida</i>	Larve	0 %	0 %	Chabert <i>et al.</i> 2012

<i>Leptopilina boulardi</i>	Larve	63-70 %	0 %	Chabert <i>et al.</i> 2012
<i>Leptopilina japonica japonica</i>	Larve	n.d.	n.d.	Daane <i>et al.</i> 2016
<i>Leptopilina heterotoma</i>	Larve	52-83 %	0%	Chabert <i>et al.</i> 2012
<i>Pachycrepoideus vindemiae</i>	Pupe	50-68 %	53-60 %	Chabert <i>et al.</i> 2012
		49 %	25-68 %	Rossi-Stacconi <i>et al.</i> 2013 Wang <i>et al.</i> 2016
<i>Trichopria drosophilae</i>	Pupe	69-85 %	38-76 %	Chabert <i>et al.</i> 2012
		17 %		Wang <i>et al.</i> 2016
<i>Ganaspis sp.</i>	Larve	-	1,8-7 %	Kasuya <i>et al.</i> 2013
<i>Ganaspis xanthopoda</i>	Larve		0 %	Mitsui et Kimura 2010

n.d. : non disponible.

La littérature fait état d'au moins quatre parasitoïdes larvaires et deux parasitoïdes pupaux pouvant attaquer la DAT (Chabert *et al.* 2012; Poyet *et al.* 2013; Stacconi *et al.* 2013; Gabarra *et al.* 2015; Miller *et al.* 2015; Moreno Carrillo *et al.* 2015). Parmi les quatre parasitoïdes larvaires, il y a *A. japonica*, *A. tabida*, *L. boulardi* et *L. heterotoma* (Tableau 1), toutefois les œufs de ces parasitoïdes sont susceptibles au système immunitaire de la DAT. Les études récentes de Chabert *et al.* (2012) et de Poyet *et al.* (2013) ont démontré que seuls les œufs d'*A. japonica* arrivent à se développer dans *D. suzukii*. Ce candidat intéressant originaire du Japon fut toutefois rarement reporté parasitant *D. suzukii* (Nomano *et al.* 2015) puisque les femelles recherchent leurs hôtes dans des fruits en fermentation, alors que *D. suzukii* s'attaque à des fruits mûrs, donc non fermentés. Pour les parasitoïdes pupaux, il en existe deux principaux *P. vindemiae* et *T. drosophilae* (Tableau 1). Pour ces parasitoïdes, le système immunitaire de la DAT influence moins la capacité de parasitisme car les œufs sont pondus entre la pupue et le puparium. *Pachycrepoideus vindemiae* et *T. drosophilae* ont aussi un potentiel important de régulation des populations de DAT et *T. drosophilae* est pour l'instant testé par la compagnie Biobest pour vérifier les possibilités de l'élevage de masse et effectuer des essais terrains en Europe (Weydert, comm. pers.). Ces parasitoïdes ne seraient donc pas commercialement disponibles pour les producteurs dans un avenir immédiat, mais sont naturellement présents en Amérique du Nord.

Plusieurs prédateurs ont été évalués en laboratoire et démontrent des résultats d'efficacité, mais avec une certaine variation entre les études. Les punaises de types *Orius sp.* et *Anthocoris sp.* peuvent attaquer les larves et adultes de la DAT (Tableau 2) (Cuthbertson *et al.* 2014; Gabarra *et al.* 2015; Woltz *et al.* 2015). Cependant ce sont aussi des prédateurs d'autres ravageurs pouvant être présents au même moment sur la culture (thrips, tétranyques, pucerons, etc). *Dalotia coriaria* et *Labidura riparia* sont deux prédateurs du sol pouvant s'attaquer aux larves et pupes de DAT lors de fortes infestations (Renkema *et al.* 2015; Gabarra *et al.* 2015). Également, ces ennemis naturels ne s'attaquent souvent qu'à un stade de développement de *D. suzukii* et si celui-ci n'est pas l'adulte, alors des dommages peuvent survenir.

Tableau 2 : Liste des parasitoïdes s'attaquant à la DAT (Tiré de Firlej et Vanoosthuyse 2017).

Espèces de prédateurs	Stade attaqué	Pourcentage de prédation	Références
<i>Orius insidiosus</i>	Larve	12-50 %	Gabarra <i>et al.</i> 2015; Woltz <i>et al.</i> 2015
<i>Orius laevigatus</i>	Adulte	17-37 %	Cuthbertson <i>et al.</i> 2014
	Oeuf	36 %	Gabarra <i>et al.</i> 2015
<i>Orius majusculus</i>	Adulte	n.d.	Cuthbertson <i>et al.</i> 2014
<i>Anthocoris nemoralis</i>	Adulte	9 %	Cuthbertson <i>et al.</i> 2014
<i>Dalotia coriaria</i>	Larve	50 %	Renkema <i>et al.</i> 2015
		9 %	Cuthbertson <i>et al.</i> 2014
<i>Labidura riparia</i>	Larve	91-96 %	Gabarra <i>et al.</i> 2015
	Pupe	61-77 %	
<i>Hypoaspis miles</i>	Larve/pupe	0 %	Cuthbertson <i>et al.</i> 2014

Le contrôle assuré par tous ces ennemis naturels pris isolément peut être diminué car ils se nourrissent de proies alternatives si les DAT sont en densité faible ou parce qu'ils s'attaquent seulement à un stade de développement de la DAT. Il a été démontré à travers différentes publications que plus la richesse en prédateurs augmente et plus la suppression d'un ravageur visé augmente également (Snyder *et al.* 2006; Letourneau *et al.* 2009). Quand les prédateurs occupent des niches similaires, il peut y avoir de la prédation intragilde (consommation des prédateurs entre eux; Polis et Holt, 1992). En revanche, si les prédateurs occupent des niches différentes (niche spatiale, niche temporelle, niche de proies...), la complémentarité des espèces assure un meilleur contrôle du ravageur que si chaque prédateur est utilisé isolément (Finke et Snyder, 2008; Straub *et al.* 2008). Afin de démontrer ces principes, différentes approches peuvent être utilisées en fonction de l'objectif visé. L'approche méthodologique additive vise à garder l'abondance de chaque prédateur fixe mais à augmenter la richesse en prédateurs avec un nombre toujours fixe pour chaque espèce. Cette approche utilise la consommation per capita de chaque prédateur pris individuellement pour prédire la consommation de toutes les espèces ensemble (Sih *et al.* 2008). Cependant, c'est dans ce genre de dispositif que s'observent les interactions intraguildes au fur et à mesure que l'abondance totale en prédateurs augmente. L'approche méthodologique substitutive vise à garder l'abondance des prédateurs fixe mais à substituer des individus en augmentant la richesse spécifique. Cette méthode compare le contrôle d'un ravageur par une communauté pauvre avec le contrôle obtenu par une communauté riche en espèces de prédateurs (Bruno et O'Connor, 2005; Northfield *et al.* 2014). L'utilisation d'une diversité d'ennemis naturels représente une avenue intéressante pour le cas particulier de la DAT puisque les ennemis naturels pris individuellement ont une action insuffisante (Tableaux 1 et 2). Cependant une fois relâchés ensemble dans la culture, ils pourraient avoir une action complémentaire. Woltz *et al.* (2015) en arrivent à la même conclusion mais cette approche n'a jamais été testée pour la DAT.

Parmi les ennemis naturels énumérés aux tableaux 1 et 2, très peu sont disponibles commercialement. C'est pourquoi une revue de littérature réalisée par P. Bonneau, candidate au doctorat dans le cadre du présent projet, a permis d'identifier cinq nouveaux prédateurs et parasitoïdes commerciaux dont le potentiel de lutte contre la DAT serait intéressant à évaluer. Il s'agit de :

- 1-*Dicyphus hesperus* (Knight) (Heteroptera : Miridae), punaise prédatrice généraliste de pucerons, mouches blanches, chenilles et acariens (McGregor *et al.* 1999);
- 2-*Podisus maculiventris* (Say) (Hemiptera : Pentatomidae), punaise prédatrice qui attaque au-dessus de 100 espèces d'arthropodes dont des chenilles, altises et doryphore de la pomme de terre (Hoffman et Frodsham 1993);
- 3-*Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera : Chrysopidae), une larve prédatrice de cochenilles, acariens, pucerons et chenilles (Scopes 1969; Lopez *et al.* 1976);
- 4-*Diglyphus isaea* (Walker) (Hymenoptera : Eulophidae) est un parasitoïde de larve de mineuse, il les tue dans les galeries puis y dépose ses œufs (Sha *et al.* 2007);
- 5-*Muscidifurax raptorellus* (Girault and Sanders) (Hymenoptera : Pteromalidae) est un parasitoïde de mouche de mouches domestiques retrouvés dans les élevages (Rueda et Axtell 1985).

Ces cinq espèces sont disponibles commercialement chez des fournisseurs comme Bugs for Bugs, Plant Products, Anatis ou Growliv. La punaise *Orius insidiosus* et le parasitoïde *Pachycrepoideus vindemmiae* sont deux ennemis naturels connus pour attaquer *D. suzukii* et serviront de référence pour les tests du premier volet expérimental.

L'objectif général de ce projet était donc de développer une méthode de lutte contre la DAT à l'aide d'ennemis naturels commerciaux. Le projet présentera une série d'expériences basées sur le principe de complémentarité des ennemis naturels afin de répondre adéquatement à cet objectif.

Les sections 6, 8 et 10 du présent rapport font l'objet d'une thèse de doctorat par Mme Phanie Bonneau. La thèse sera soumise pour évaluation au cours de l'année 2020 et subséquemment rendue publique.

2 TEST D'EFFICACITÉ DE PRÉDATEURS-PARASITOÏDES EN LABORATOIRE POUR LUTTER CONTRE LA DAT

2.1 OBJECTIFS

L'objectif de ce volet était d'étudier l'efficacité d'ennemis naturels commerciaux qui n'ont jamais été testé pour l'instant sur ce ravageur pour lutter contre *D. suzukii*. Le but étant de valider l'efficacité de ces ennemis naturels quand plusieurs stades de vie de *D. suzukii* leur sont présentés dans des framboises infestées. Ce volet a fait l'objet d'une publication récente par Bonneau *et al.* 2019.

2.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.2.1 Les colonies d'insectes

Les *D. suzukii* provenaient d'une colonie maintenue à 23 ± 1 °C et $50 \pm 10\%$ d'humidité relative (HR) avec une photopériode quotidienne de 16 h de lumière et 8 h d'obscurité (16L : 8O) dans des cages de plexiglass installées dans une chambre d'élevage de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, Québec. Les œufs étaient pondus pendant 48 h dans des framboises placées sur 350 g de diète artificielle. La diète était utilisée par les larves pour se nourrir et former leurs pupes. La diète consistait en un mélange de 70 g de levure de bière, 150 g de poudre de carotte, de 2,5 g de benzoate de sodium, de 2 g de méthylparaben, de 50 mL de 1N HCl et de 800 mL d'eau distillée. Les adultes de *D. suzukii* étaient nourris avec un mélange de sucre et de levure de bière alimentaire en flocon.

Les parasitoïdes *M. raptorellus* ont été achetés à Bugs for Bugs (Guelph, ON) et ont été élevés sur des pupes de mouches domestiques *Musca domestica* Linnaeus (Diptera: Muscidae). Les parasitoïdes ont ensuite été triés selon leur sexe puis transférés dans une cage de plexiglass avec de l'eau et du sucre jusqu'à leur utilisation pour le projet. Les femelles étaient âgées minimalement de 3 à 4 jours pour la réalisation de l'expérience.

Le parasitoïde *P. vindemmiæ* est issu d'une colonie démarrée en 2017 à l'IRDA et maintenue sur des pupes de *D. suzukii* à 22 ± 1 °C, HR : $55 \pm 10\%$, photopériode : 16 L : 8 O. Le parasitoïde est issu d'une souche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC-Agassiz, CB), récoltée en 2015 sur des cerises infestées de la région de Summerland (CB). Le prédateur larvaire *C. carnea*, le prédateur adulte *O. insidiosus* et le parasitoïde *D. isaea* ont été achetés à PlantProducts (Leamington, ON) tandis que prédateur adulte *D. hesperus* et la nymphe de *P. maculiventris* ont été achetés à Anatis Bioprotection (Saint-Jacques-le-Mineur, QC). Les individus de ces cinq insectes bénéfiques ont été maintenus au frais dans leur emballage pendant une journée avant leur utilisation.

2.2.2 Expérience d'efficacité des parasitoïdes et prédateurs contre tous les stades de *D. suzukii*

Le contenant utilisé pour les expériences était une boîte de plastique transparente de 1 litre avec une ouverture recouverte d'un manchon de mousseline de 40 cm de long. Chaque boîte contenait un plat de Pétri de 10 cm de diamètre (177 mL) où étaient placées cinq framboises biologiques achetées en épicerie la journée de l'expérience. La première journée de l'expérience, cinq femelles de *D. suzukii* de 3 jours étaient placées dans chaque boîte afin de pondre dans les cinq framboises. Après x h les femelles de DAT ont été retirées. Deux framboises étaient ajoutées tous les trois jours pour éviter d'avoir uniquement des fruits en décomposition dans les contenants expérimentaux. Les espèces ont été testées individuellement et l'ajout des ennemis naturels a été fait au troisième, quatrième et neuvième jour d'expérience respectivement pour les prédateurs, le parasitoïde larvaire *D. isaea* et finalement pour *P. vindemmiæ* et *M. raptorellus*. Dix-huit femelles de parasitoïdes (3-5 jours d'âge et accouplées) ou 18 individus de prédateurs étaient ajoutés par boîte. La séquence et les densités choisies ont fait l'objet de tests préalables. Les boîtes étaient ensuite déposées dans un cabinet de croissance (22 ± 1 °C; HR : $55 \pm 10\%$; photopériode : 16 L : 8 O) pour une période de 15 jours.

L'expérience a été réalisée en deux blocs temporels, un bloc avec les parasitoïdes et un bloc avec les prédateurs le tout avec huit répétitions pour chaque traitement et un traitement témoin pour chaque bloc. Après 15 jours, soit le temps requis pour le développement d'un cycle de vie complet de *D. suzukii* sous les conditions de laboratoire, les prédateurs, les parasitoïdes, larves, pupes et adultes de *D. suzukii* vivants ont été comptabilisés. Le plat de plastique était immergé dans l'eau pour récupérer les individus par flottation sans les abîmer et pour faciliter leur décompte. Pour les boîtes avec les parasitoïdes larvaires *D. isaea*, les larves de *D. suzukii* ont été récupérées et placées dans des contenants de 500 mL remplis de diète artificielle et conservées en cabinet de croissance (22 ± 1 °C; HR : $55 \pm 10\%$; photopériode : 16 L : 8 O) pendant 35 jours pour déterminer le taux de pupaison de *D. suzukii* et le taux d'émergence des adultes. Toutes les pupes retrouvées dans les différents traitements ont été placées pendant 35 jours dans une plaque Elisa à raison d'une pupue par puit afin d'observer l'émergence des *D. suzukii* ou des parasitoïdes. Le taux de parasitisme, le nombre de parasitoïdes émergeant d'une pupue, le sex-ratio et la taille des adultes ont été mesurés.

La taille du parasitoïde adulte est caractérisée grâce à la longueur du tibia de la patte arrière gauche (Godfray 1994). Les mesures ont été réalisées en retirant le tibia de la patte métathoracique, en prenant une photo et en mesurant le tibia avec un stéréomicroscope électronique Zeiss SteREO Discovery V12 équipé d'une caméra Zeiss Axiocam 503 3 Mpix et en utilisant le logiciel EN 2012 SP2 blue edition (© Carl Zeiss Microscopy GmbH, 2011).

Pour *M. raptorellus*, les mesures de 15 mâles et 15 femelles émergents de *M. domestica* ont servi de témoin. Pour les individus issus des expériences, 15 mâles et 15 femelles ont été mesurés quand un seul parasitoïde par pupue émergeait. Quinze pupes ont été sélectionnées au hasard quand deux parasitoïdes ou plus émergeaient d'une pupue. Pour *P. vindemmia*, les mesures de 15 mâles et 15 femelles qui ont émergé de l'élevage sur *D. suzukii* ont servi de témoin. Pour les individus issus des expériences, 15 mâles et 15 femelles ont été mesurés quand un parasitoïde par pupue émergeait.

2.2.3 Efficacité des prédateurs contre un seul stade de *D. suzukii*

Le contenant utilisé pour les expériences était un plat de 10 cm de diamètre (177 mL) où était déposée une feuille de framboise (var. 'Polana') issue de plants biologiques pour servir de support pour certains stades de la *D. suzukii*. Le pétiole était inséré dans un trou pratiqué dans le couvercle d'un microtube de 2 mL contenant de l'eau distillée afin de garder la feuille fraîche. Chaque plat contenait 6 individus d'un seul stade de *D. suzukii* (œuf, larve, pupue ou adulte). Un prédateur (soit *O. insidiosus*, *D. hesperus*, *P. maculiventris* ou *C. carnea*), affamé depuis 24 heures, était placé sur la feuille de framboisier. Les plats de plastiques étaient ensuite placés en chambre de croissance (22 ± 1 °C; HR : $55 \pm 10\%$; photopériode : 16 L : 8 O) pour 24 heures. Une série de plats a été réalisée sans introduction de prédateurs pour servir de témoin. Au bout des 24 heures d'incubation, les prédateurs étaient enlevés des plats et les stades consommés de *D. suzukii* ont été comptés dans les quatre traitements et les témoins. Les larves s'étant développées en pupes durant l'expérience ont été conservées pour déterminer le taux d'émergence des adultes et vérifier si elles avaient subi de la prédation. Quinze répétitions ont été effectuées pour chaque prédateur et chaque stade de *D. suzukii*.

2.2.4 Analyse des données

Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel JMP (version 12.0.1, SAS Institute Inc., Cary, Caroline du Nord, États-Unis). Les données ont été testées avec le test de Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus et l'erreur de la variance pour l'homoscédasticité. Les données des expériences sur l'efficacité des parasitoïdes et les prédateurs contre les stades de *D. suzukii* ont été analysées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple DSH de Tukey - Kramer ($p < 0,05$). Les données sur les adultes vivants de *D. suzukii*, les données des expériences sur les prédateurs avec un seul stade de *D. suzukii* et les mesures des pattes de *M. raptorellus* issues des pupes de *D. suzukii* ne rencontraient pas les exigences pour des tests paramétriques et ont été analysées à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis, suivi d'un test de comparaison multiple de Dunn ($p < 0,05$). Les données de pupes *D. suzukii* parasitées pour chaque espèce de parasitoïde et les mesures des pattes des individus issus de *P. vindemmia* ont été analysées à l'aide d'un test t de Student ($p < 0,05$). Les données de sex-ratio des parasitoïdes émergeant des pupes de *D. suzukii* ont été analysées à l'aide d'un test de chi carré ($p < 0,05$) afin de comparer les sex-ratios pour chaque ponte.

2.3 RÉSULTATS

2.3.1 Expérience d'efficacité des parasitoïdes et prédateurs contre tous les stades de *D. sukuzii*

Après 15 jours, *M. raptorellus* et *P. vindemmiae* ont significativement réduit le nombre de *D. sukuzii* de 40% et 43%, respectivement, par rapport au témoin ($F_{3,27} = 15,97$, $p < 0,0001$) (Figure 1). Seul *P. vindemmiae* a provoqué une diminution significative du nombre moyen d'adultes vivants de *D. sukuzii* ($\chi^2 = 25,54$, $df = 3$, $p < 0,0001$). Les deux parasitoïdes pupaux ont également diminué significativement le nombre de pupes de *D. sukuzii* comparativement au témoin ($F_{3,27} = 8,81$, $p = 0,0003$). Le parasitoïde larvaire *D. isaea* n'a eu aucun impact sur les différents stades de *D. sukuzii*. À la fin de l'expérience, il y avait $7,0 \pm 4,2$ *M. raptorellus* vivants et $14,3 \pm 2,7$ *P. vindemmiae* vivants, mais tous les individus de *D. isaea* étaient morts.

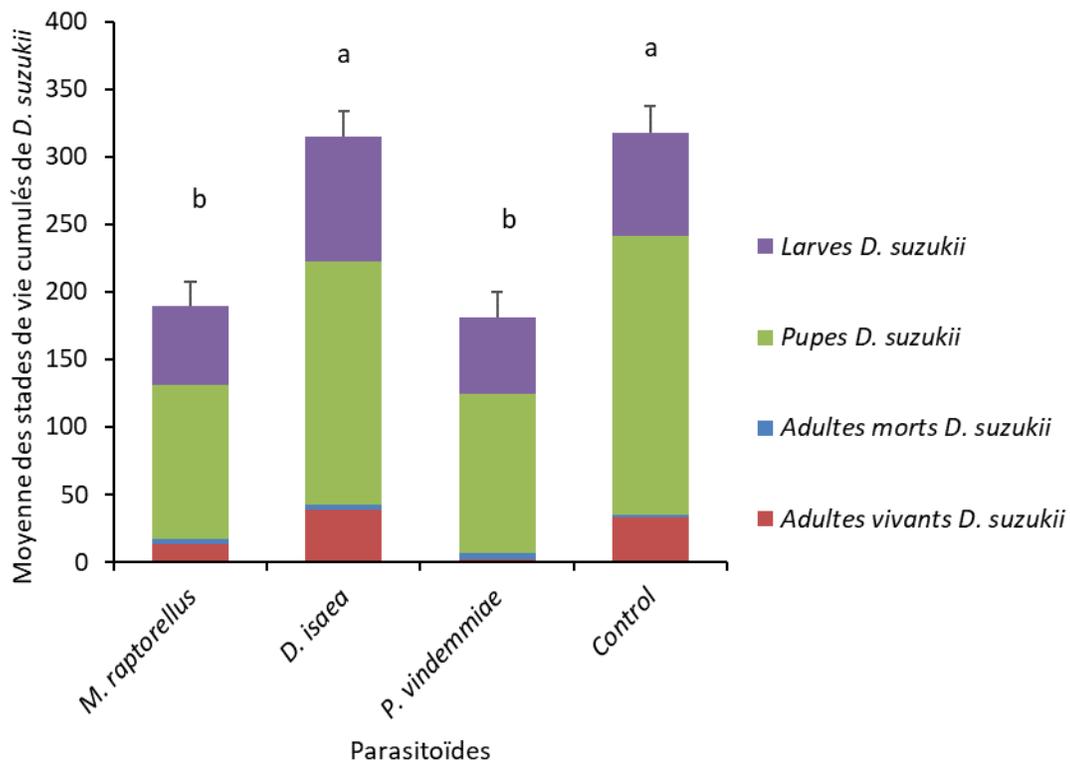


Figure 1. Moyenne (\pm SE) du nombre d'individus de *D. sukuzii* cumulés pour les larves, pupes et adultes morts et vivants retrouvés après 15 jours d'exposition aux trois espèces de parasitoïdes. Les moyennes cumulatives avec la même lettre n'étaient pas significativement différentes (HSD de Tukey-Kramer, $p < 0,05$) (Tiré de Bonneau *et al.* 2019).

Après 15 jours, les prédateurs ont eu un effet significatif sur le nombre total de *D. sukuzii* retrouvés peu importe le stade ($F_{4,33} = 14,01$, $p < 0,0001$). Les adultes d'*Orius insidiosus* et les larves de *C. carnea* ont réduit les effectifs de *D. sukuzii* de 49% et 32% respectivement, alors que *D. hesperus* et *P. maculiventris* n'ont pas réduit de manière significative le nombre de *D. sukuzii* par rapport au témoin (Figure 2). Les prédateurs *O. insidiosus* et *C. carnea* ont provoqué une diminution du nombre d'adultes vivants de *D. sukuzii* ($\chi^2 = 20,55$, $df = 4$, $p = 0,0004$) et de pupes ($F_{4,33} = 6,32$, $p = 0,0007$). Les prédateurs *O. insidiosus* et *D. hesperus* ont réduit le nombre de larves de *D. sukuzii* ($F_{4,33} = 6,91$, $p = 0,0004$). Le prédateur *P. maculiventris* n'a eu aucun impact sur les stades de *D. sukuzii*. A la fin de l'expérience, $4,5 \pm 3,5$ *O. insidiosus*, $2,4 \pm 1,5$ *C. carnea*, $13,0 \pm 0,9$ *D. hesperus* et $7,6 \pm 1,7$ *P. maculiventris* ont été retrouvés vivants.

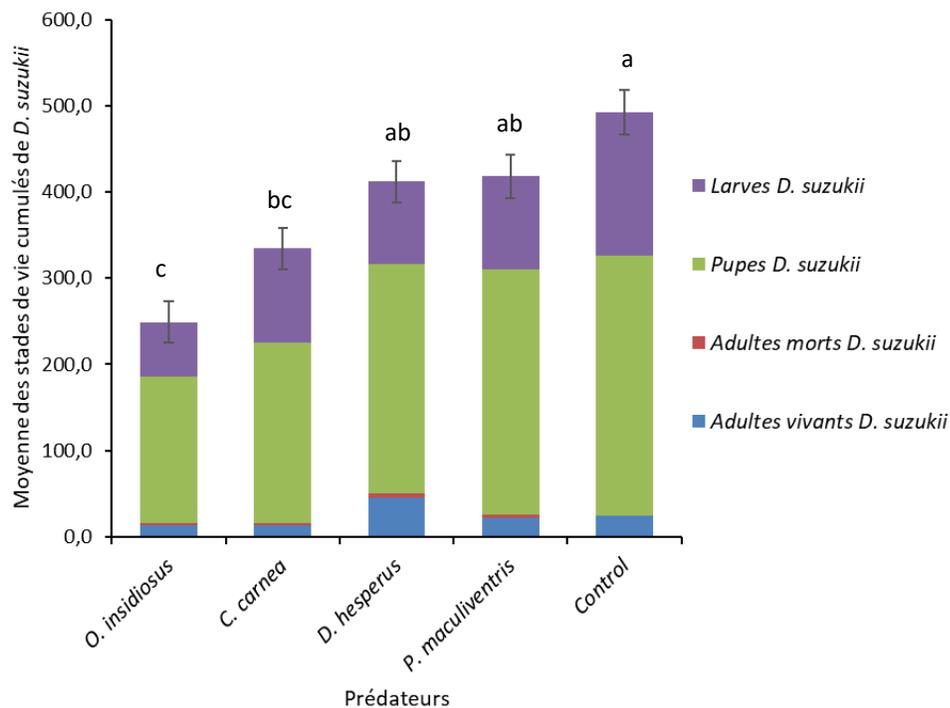


Figure 2. Moyenne (\pm SE) du nombre d'individus de *D. sukuzii* cumulés pour les larves, pupes et adultes morts et vivants retrouvés après 15 jours d'exposition à des prédateurs. Les moyennes cumulatives avec la même lettre n'étaient pas significativement différentes (HSD de Tukey, $p < 0,05$) (Tiré de Bonneau *et al.* 2019).

2.3.2 Efficacité des prédateurs contre un seul stade de *D. sukuzii*

La prédation s'est produite principalement sur les œufs et les larves de *D. sukuzii* (Figure 3). Les prédateurs *C. carnea*, *D. hesperus* et *O. insidiosus* ont pu se nourrir des œufs de *D. sukuzii* ($\chi^2 = 47,88$, $df = 4$, $p < 0,0001$) et les prédateurs *C. carnea*, *O. insidiosus* et *P. maculiventris* ont pu se nourrir de larves de *D. sukuzii* ($\chi^2 = 34,54$, $df = 4$, $p < 0,0001$). Aucun des quatre prédateurs n'a pu s'attaquer significativement aux adultes et aux nymphes de *D. sukuzii* ($\chi^2 = 10,25$, $df = 4$, $p = 0,0363$; $\chi^2 = 8,54$, $df = 4$, $p = 0,0737$). À la fin de l'expérience, tous les prédateurs ont été retrouvés vivants, à l'exception de deux *D. hesperus*. La plupart des stades de *D. sukuzii* ont été retrouvées vivantes dans les traitements témoin, à l'exception des adultes, dont près de 50% sont décédées en l'absence de nourriture.

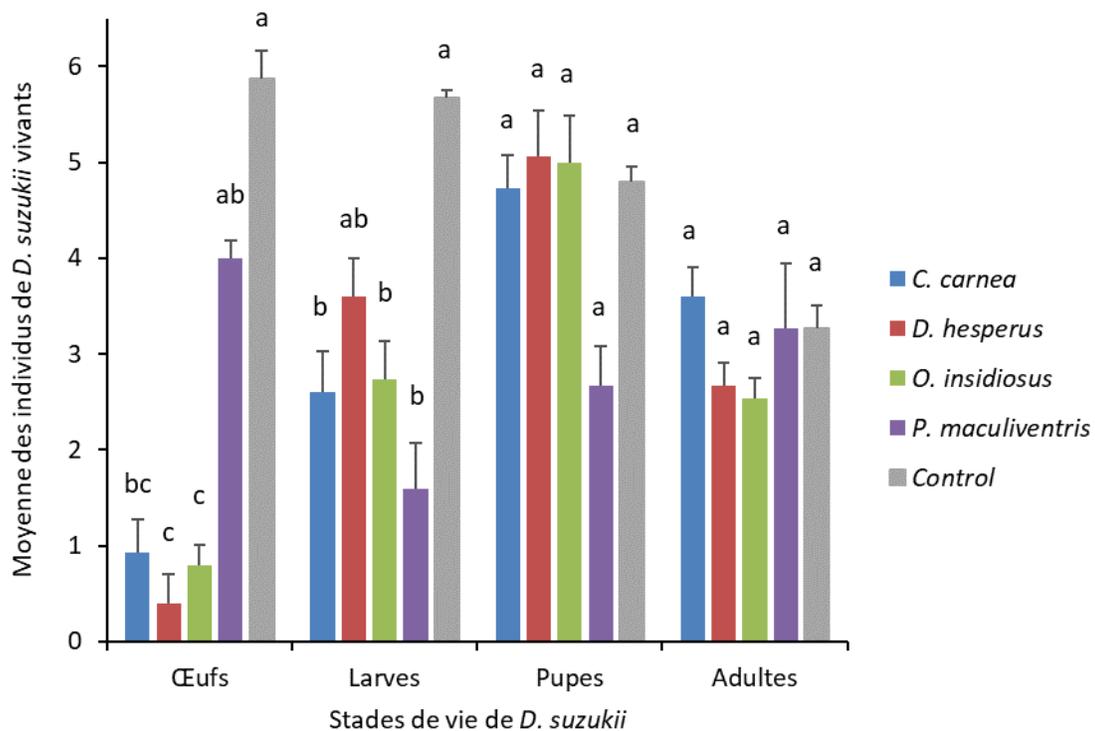


Figure 3. Nombre moyen (\pm SEM) d'individus de *D. sukukii* retrouvés après une exposition de 24 h à des prédateurs (larve de *C. carnea*, *D. hesperus* adulte, *O. insidiosus* adulte ou nymphe de *P. maculiventris*). Les moyennes pour chaque stade avec la même lettre n'étaient pas significativement différentes (test de Dunn, $p < 0,05$) (Tiré de Bonneau et al. 2019).

2.3.3 Parasitisme

M. raptorellus et *P. vindemmiae* ont tous deux réussi à parasiter des pupes de *D. sukukii* et avaient des taux de parasitisme similaires ($t_{14} = 0,28$, $p = 0,7804$) (Tableau 2). *M. raptorellus* comptait 810 pupes de *D. sukukii* parasitées en 15 jours sur un total de 1866 pupes, produisant une moyenne de 1,9 parasitoïdes par pupes parasitée avec 43,9% de femelles (674 femelles et 861 mâles) (Figure 4a). Pour *P. vindemmiae*, il y avait un total de 839 pupes de *D. sukukii* parasitées en 15 jours sur un total de 1873 pupes, produisant une moyenne d'un parasitoïde par pupes de *D. sukukii* avec 53,5% de femelles (447 femelles et 392 mâles) (Figure 4a). Pour *M. raptorellus*, la proportion de femelles diminuait lorsque la taille de la couvée augmentait et le sex-ratio de la taille de la couvée contenant trois (41,5% de femelles), quatre (34,1% de femelles) et cinq (26,7% de femelles) parasitoïdes était significativement différent de 1 : 1 ($\chi^2 = 12,42$, $df = 1$, $p = 0,0004$; $\chi^2 = 13,36$, $df = 1$, $p = 0,0003$; $\chi^2 = 6,53$, $df = 1$, $p = 0,0106$, respectivement) (Figure 4a). Pour *P. vindemmiae*, le sex-ratio n'était pas significativement différent de 1 : 1 ($\chi^2 = 3,61$, $df = 1$, $p = 0,0576$) (Figure 4a). Il y avait une pupes à partir de laquelle six adultes de *M. raptorellus* (trois mâles et trois femelles) ont émergé, non représentée sur la figure. La taille de *M. raptorellus* provenant de pupes de *M. domestica* (témoin) est supérieure à ceux provenant de *D. sukukii* mais significativement différente seulement pour les mâles et les femelles provenant de pupes contenant 3, 4 et 5 parasitoïdes ($\chi^2 = 68,96$, $df = 5$, $p < 0,0001$; $\chi^2 = 67,23$, $df = 5$, $p < 0,0001$, respectivement) (Figure 4b). La taille de *P. vindemmiae* issus de *D. sukukii* au cours de l'expérience n'est pas significativement différente de celle du témoin, tant chez les mâles que chez les femelles ($t_{28} = 0,00$, $p = 0,9971$; $t_{28} = 1,36$, $p = 0,1848$, respectivement) (Figure 4b).

Tableau 2. Succès de parasitisme pour chaque espèce de parasitoïdes (n = 18). Les nombres moyens de pupes parasitées de *D. sukii* avec une lettre identique ne diffèrent pas significativement (Test de Student, p < 0.05) (Tiré de Bonneau *et al.* 2019).

Espèces de parasitoïdes	Nombre moyen de pupes de <i>D. sukii</i> par répétition (± EM)	Nombre moyen de pupes parasitées de <i>D. sukii</i> avec émergence d'un parasitoïde (± EM)	Succès de parasitisme (%)
<i>M. raptorellus</i>	232,3 ± 50,9	100,9 ± 26,1 a	43,4
<i>P. vindemmiae</i>	232,5 ± 45,5	104,3 ± 21,2 a	44,8

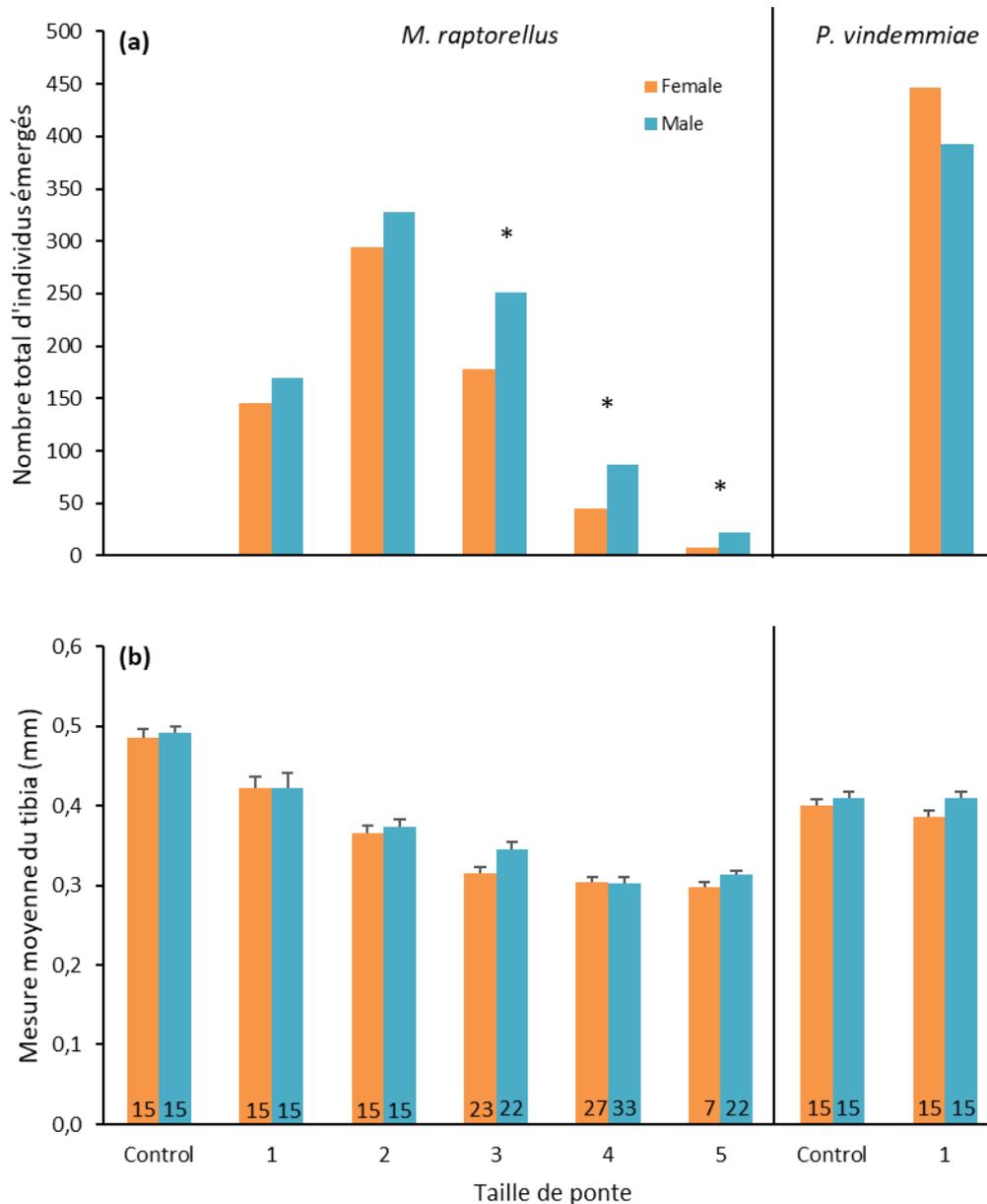


Figure 4. Nombre total d'individus (a) et moyennes (± SE) de la longueur du tibia postérieur gauche (b) de *M. raptorellus* et de *P. vindemmiae* parasitoïdes issus de pupes de *D. sukii* à différentes tailles de couvée dans des framboises en conditions de laboratoire. Les astérisques au-dessus des barres dans la figure (a) indiquent des sex-ratios différents de 1 : 1 pour chaque taille de ponte (chi carré, p < 0,05), et les barres avec la même lettre dans le panneau (b) ne sont pas significativement différentes (*M. raptorellus*: test de Dunn test de comparaison multiple suite à un test de Kruskal – Wallis p < 0,05; *P. vindemmiae*: test t de Student, p < 0,05) pour chaque sexe et espèce de

parasitoïde. Les nombres dans les histogrammes de la figure (b) sont les individus mesurés (Tiré de Bonneau *et al.* 2019).

2.4 CONCLUSION

Les résultats des expériences ont montré la capacité de *M. raptorellus* à parasiter les pupes de *D. sukuzii* en laboratoire avec un niveau d'efficacité comparable à celui de *P. vindemmiae*, bien que le taux de parasitisme de *P. vindemmiae* dans notre étude (45%) soit inférieur à celui rapporté en Europe (57% et 53%) (Chabert *et al.* 2013; Stacconi *et al.* 2013). *Diglyphus isaea* n'a pas été en mesure de parasiter les larves de *D. sukuzii* et la plupart des *D. sukuzii* mises en contact avec ce parasitoïde ont réussi à former des pupes avec succès. De plus, nous n'avons pas observé d'adulte *D. isaea* vivant dans les arènes expérimentales à la fin de l'expérience. Les résultats des expériences sur les prédateurs mis en contact avec les stades isolés ou tous les stades confondus ont montré que *O. insidiosus* et *C. carnea* étaient des prédateurs efficaces de *D. sukuzii*. *Chrysoperla carnea* et *O. insidiosus* ont réduit les effectifs de *D. sukuzii* de 32% et 49%, respectivement. Les deux prédateurs se nourrissent essentiellement des œufs et larves de *D. sukuzii*. Nous avons constaté que *P. maculiventris* ne se nourrissait que de larves et *D. hesperus* ne se nourrissait que d'œufs. Aucun des prédateurs ne semblait pouvoir attaquer les *D. sukuzii* adultes. *Podisus maculiventris* et *D. hesperus* ont réduit les nombres de *D. sukuzii* de 15% et 16% respectivement, mais sans que cela soit significativement différent du nombre de *D. sukuzii* présents dans le témoin. Par conséquent, il semble que les prédateurs qui se nourrissent principalement des premiers stades de la vie de *D. sukuzii*, tels que les œufs et les larves, puissent réduire la population de *D. sukuzii* au sein de l'arène expérimentale au cours de l'expérience. À la suite des résultats de cette expérience, nous avons sélectionnés les deux prédateurs commerciaux *O. insidiosus* et *C. carnea* et le parasitoïde commercial *M. raptorellus* pour poursuivre les expériences.

3 SUSCEPTIBILITÉ DES ENNEMIS NATURELS CHOISIS À DIFFÉRENTS BIOPESTICIDES

3.1 OBJECTIFS

L'objectif de ce volet était d'évaluer en laboratoire la susceptibilité des deux prédateurs, *C. carnea* et *O. insidiosus*, et du parasitoïde, *M. raptorellus*, à cinq biopesticides, ainsi qu'à un témoin positif (MALATHION) et un témoin négatif (eau distillée) pour un total de sept traitements. Le but étant de vérifier la compatibilité de ces ennemis naturels avec des produits utilisés au champ pour d'autres insectes ou acariens problématiques en production de framboises, fraises ou bleuets.

3.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.2.1 Les colonies d'insectes

Les parasitoïdes *M. raptorellus* ont été achetés à Bugs for Bugs (Guelph, ON) et ont été élevés sur des pupes de mouches domestiques *M. domestica*. Les parasitoïdes ont été triés selon le sexe puis transférés dans une cage de plexiglass avec une source d'eau et de sucre jusqu'à leur utilisation pour le projet. Les femelles étaient âgées minimalement de 3 à 4 jours pour l'expérience. Le prédateur larvaire *C. carnea* et le prédateur adulte *O. insidiosus* ont été achetés à PlantProducts (Leamington, ON) et maintenus au frais une journée avant leur utilisation pour le projet. Les ennemis naturels ont été nourris avant les essais pour s'assurer d'avoir des individus vigoureux.

3.2.2 Les bioessais

Les produits testés pour évaluer leurs effets toxiques sur les trois ennemis naturels étaient ENTRUST SC, BIOPROTEC CAF, PYGANIC EC 1,4, SAFER'S, TROUNCE et finalement le MALATHION comme témoin positif et l'eau distillée comme témoin négatif (Tableau 1). Toutes les doses testées sont celles homologuées pour des ravageurs de la culture de

framboise, fraise ou bleuet (SAGe Pesticides) (Tableau 3). Les feuilles et les fruits de framboisier ont été obtenus de production biologique et ont été rincés trois fois avant leur utilisation. Les feuilles et fruits ont été trempés 10 secondes dans 400 mL d'une solution de pesticide préparée à la dose recommandée juste avant le trempage et maintenue homogène grâce à un agitateur magnétique à 350 rpm. La méthode de trempage de feuilles et fruits utilisée est celle recommandée par l'Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) (Porter, 2009). Les feuilles et fruits étaient ensuite séchés sur un grillage puis déposés dans un plat de plastique étanche de 10 cm de diamètre (177 mL). Dix répétitions ont été effectuées pour les prédateurs où un seul individu était introduit par boîte afin d'éviter le cannibalisme. Pour le parasitoïde, dix individus qui ont été introduits par boîte et cinq répétitions ont été effectuées. Les ennemis naturels étaient introduits dans le plat au maximum 2h après le trempage et la mortalité des individus était observée 24, 48 et 72h après leur introduction dans le plat. Avant la prise de données des plats étaient déposés dans un cabinet de croissance (22 °C, 50% HR et photopériode de 16L :8O).

Les individus ont été classés selon 3 catégories:

- Vivants: adultes qui réagissaient et se déplaçaient lorsque touchés avec un pinceau.
- Moribonds: adultes qui réagissaient au toucher, mais ne se déplaçaient plus.
- Morts: adultes qui ne réagissaient plus au toucher et ne se déplaçaient plus.

Tableau 3 : Descriptif des produits phytosanitaires utilisés pour l'expérience

Nom commercial	Matière active	Dose utilisée
Malathion 85E	Malathion 85%	1L dans 1000L/ha
Entrust SC	Spinosad 240g/L	364 mL/ha
Pyganic EC 1,4	Pyréthrines 1,4%	4,65 L/ha
Safer's	Sels de potassium d'acide gras 50,5%	2 L pour 100 L d'eau
Trounce	Sels de potassium d'acide gras 20% Pyréthrines 0,2%	5L pour 100L d'eau
Bioprotec CAF	Bacillus thuringiensis var. kurstaki (souche EVB113-19)	2,8 L/ha

3.2.3 Analyses des données

Seuls les résultats de la mortalité après 72h ont été analysés à l'aide du logiciel JMP (version 12.0.1, SAS Institute Inc., Cary, Caroline du Nord, États-Unis). Le taux de mortalité a été calculé en faisant la somme des adultes morts et moribonds après 72h, divisés par le nombre total d'adultes traités par plat. Les données ont été analysées grâce au test de Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus et l'erreur de la variance pour l'homoscédasticité. Pour chaque ennemi naturels, la mortalité occasionnée par les traitements insecticides et selon le support végétal utilisé a été comparée à un témoin traité à l'eau distillée grâce à une analyse variance à deux critères (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple DSH de Tukey - Kramer ($p < 0,05$). La représentation graphique des données est par contre en pourcentage de mortalité.

3.3 RÉSULTATS

Selon la norme de l'IOBC (Boller *et al.* 2006), les différentes catégories de toxicité des pesticides sont comme suit : 1) peu toxique = <30%; 2) légèrement toxique=30–79%; 3) modérément toxique = 80–99% et 4) toxique = >99%. Dans le cas de notre expérience, quelques soient les traitements, les deux pesticides MALATHION et ENTRUST sont ceux ayant provoqué le plus de mortalités des trois ennemis naturels (Figures 5, 6 et 7) (Wilcoxon $p < 0,01$) et qui peuvent être considérés comme toxiques à modérément toxiques. Le SAFER'S, le BIOPROTEC CAF et le TROUNCE sont les trois biopesticides ayant provoqué le moins de mortalités sur les trois ennemis naturels et sont souvent dans la catégorie légèrement ou peu toxique.

Pour le prédateur *O. insidiosus*, 100% des individus sont morts après une exposition de 72h au MALATHION et de 53 à 80% sont morts après une exposition au ENTRUST SC sur fruit ou feuille. Tous les autres biopesticides ont induit une mortalité de 6 à 28% ce qui est considéré comme peu toxique selon la norme IOBC.

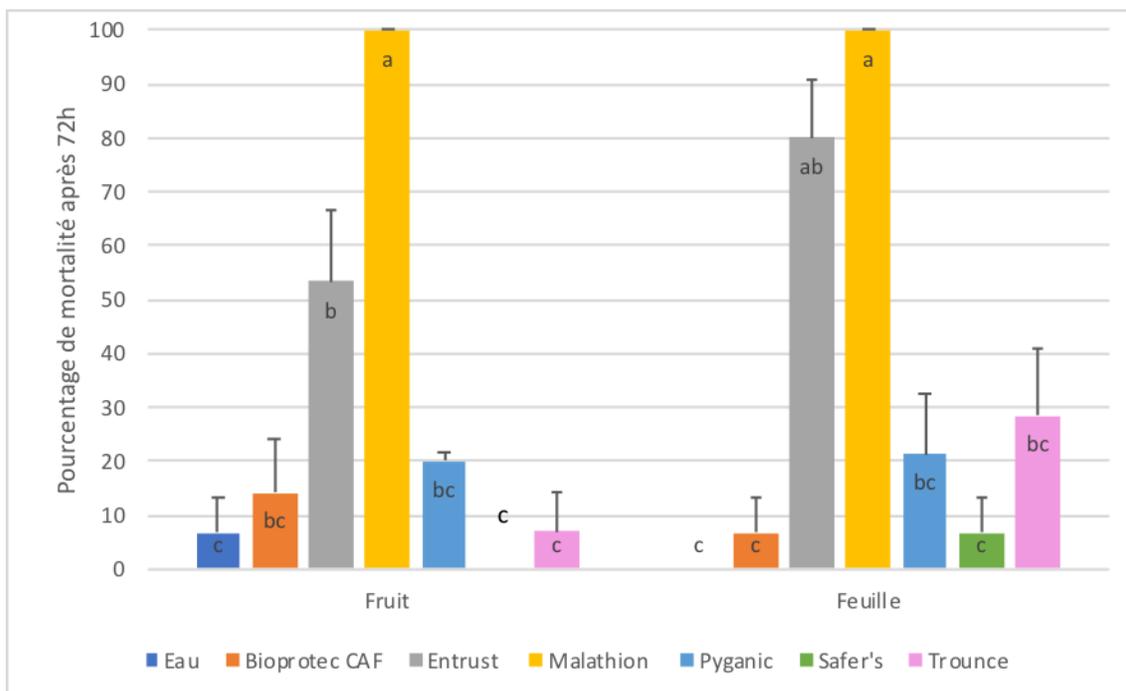


Figure 5 : Pourcentage de mortalité d'adultes *O. insidiosus* après 72h d'exposition à différents pesticides appliqués sur un fruit ou une feuille de framboisier. Des lettres différentes indiquent une différence significative à $p < 0,01$ (test de Wilcoxon)

Pour le prédateur *C. carnea*, de 73 à 100% des individus sont morts après une exposition de 72h au MALATHION et de 33 à 73% sont morts après une exposition au ENTRUST SC sur fruit ou feuille. Tous les autres biopesticides ont induit une mortalité de 3 à 33% ce qui est considéré comme peu toxique selon la norme IOBC.

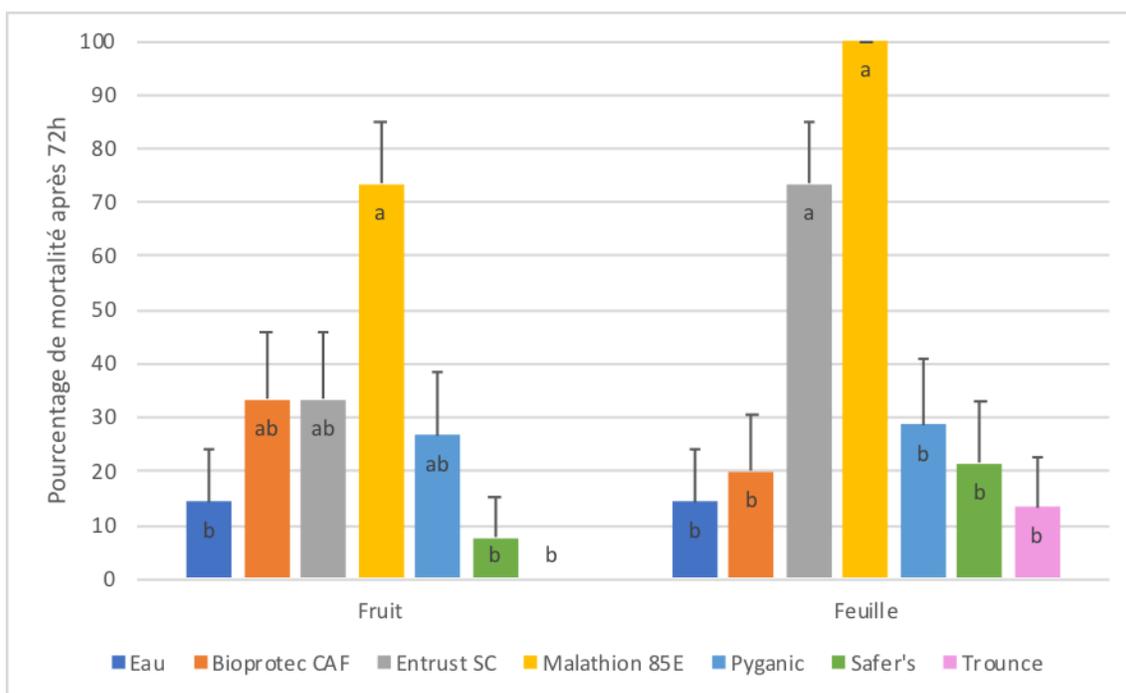


Figure 6 : Pourcentage de mortalité de larves de *C. carnea* après 72h d'exposition à différents pesticides appliqués sur un fruit ou une feuille de framboisier. Des lettres différentes indiquent une différence significative à $p < 0,01$ (test de Wilcoxon)

Pour le parasitoïde *M. raptorellus*, de 73 à 100% des individus sont morts après une exposition de 72h au MALATHION et de 33 à 73% sont morts après une exposition au ENTRUST SC sur fruit ou feuille. Le PYGANIC a aussi induit une mortalité de 30 à 40 % ce qui le classe dans les produits légèrement toxiques. Tous les autres biopesticides ont induit une mortalité de 2 à 28% ce qui est considéré comme peu toxique selon la norme IOBC.

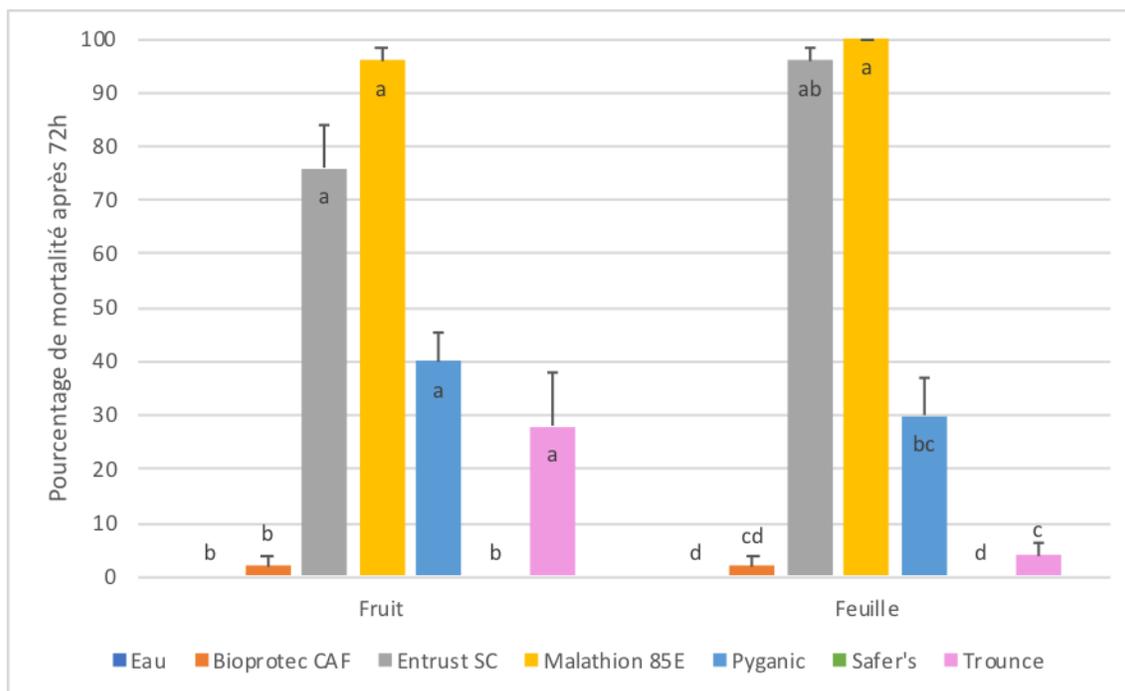


Figure 7 : Pourcentage de mortalité de larves de *M. raptorellus* après 72h d'exposition à différents pesticides appliqués sur un fruit ou une feuille de framboisier. Des lettres différentes indiquent une différence significative à $p < 0,01$ (test de Wilcoxon)

3.4 CONCLUSION

Tel que déjà confirmé précédemment (Firlej *et al.* 2019), le spinosad commercialisé sous la formule d'ENTRUST SC est un biopesticide qui peut être modérément toxique pour les ennemis naturels et doit être appliqué à des moments où ceux-ci sont absents de la culture. Tous les autres biopesticides sont peu à légèrement toxiques pour *O. insidiosus* et *M. raptorellus* ce qui suggère que ces deux ennemis naturels pourraient être compatibles avec une régie de production biologique utilisant ces produits en alternance pour lutter contre les tétranyques à deux points, les chenilles, les pucerons et les cicadelles. De plus, les données de mortalité pourraient servir à corriger les taux d'introduction des ennemis naturels afin de compenser les pertes occasionnées par les traitements insecticides peu ou légèrement toxiques.

4 EFFICACITÉ D'UN AGENCEMENT D'ENNEMIS NATURELS EN CONDITIONS LABORATOIRE ET SEMI-NATURELLE

4.1 OBJECTIF

L'objectif de ce volet était d'étudier la combinaison d'ennemis naturels commerciaux pour contrôler *D. suzukii* en laboratoire et en conditions semi-naturelles sous serres. L'idée étant de tester différents agencements de *C. carnea*, *O. insidiosus* et *M. raptorellus* afin de vérifier leur efficacité complémentaire à contrôler des populations de *D. suzukii* dans deux conditions d'expériences différentes.

4.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.2.1 Les colonies d'insectes

Les *D. suzukii* proviennent d'une colonie maintenue à 23 ± 1 °C; HR : $50 \pm 10\%$; photopériode de 16 L: 8 O; dans des cages de plexiglass installées dans une chambre d'élevage de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, Québec. Les œufs sont pondus pendant 48 h dans des framboises placées sur 350 g de diète artificielle utilisée par les larves pour se nourrir et former leurs pupes. La diète consiste en un mélange de 70 g de levure de bière, 150 g de poudre de carotte, de 2,5 g de benzoate de sodium, de 2 g de méthylparaben, de 50 mL de 1N HCl et de 800 mL d'eau distillée. Les adultes de *D. suzukii* sont nourris avec un mélange de sucre et de levure de bière alimentaire en flocon. Dans le cadre de l'élevage pour les essais en serres, les *D. suzukii* provenaient d'un élevage réalisé au laboratoire du Dr D. J. Renkema avec la même diète que décrite ci-dessus. Les adultes de *D. suzukii* étaient juste maintenus avec de l'eau.

Les parasitoïdes *M. raptorellus* ont été achetés à Bugs for Bugs (Guelph, ON, Canada) et étaient élevés sur des pupes de mouches domestiques *M. domestica*. Les parasitoïdes ont été triés selon le sexe puis transférés dans une cage de plexiglass avec une source d'eau et de sucre jusqu'à leur utilisation pour le projet. Les femelles étaient âgées minimalement de 3 à 4 jours pour l'expérience. Le prédateur larvaire *C. carnea* et le prédateur adulte *O. insidiosus* ont été achetés à PlantProducts (Leamington, ON, Canada) et maintenus au frais dans leur emballage durant une journée avant leur utilisation.

4.2.2 Efficacité en laboratoire

Le contenant utilisé pour les expériences en laboratoire était une boîte de plastique transparente de 1 litre avec une ouverture recouverte d'un manchon de mousseline de 40 cm. Chaque boîte contenait un plat de plastique de 10 cm de diamètre (177 mL) où étaient déposées cinq framboises biologiques achetées en épicerie la journée de l'expérience. La première journée de l'expérience, cinq femelles de *D. suzukii* de 3 jours étaient placées dans chaque boîte pour effectuer la ponte dans les cinq framboises. Deux framboises étaient ajoutées tous les trois jours au plat de pétri pour éviter d'avoir uniquement des fruits en décomposition. Différents agencements de prédateurs et parasitoïdes ont été testés tel qu'indiqué ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4 : Composition en espèces des différents traitements utilisés.

Richesse spécifique	<i>Muscidifurax raptorellus</i>	<i>Orius insidiosus</i>	<i>Chrysoperla carnea</i>	Abondance totale
3	6	6	6	18
2	9	9	0	18
2	9	0	9	18
2	0	9	9	18
0	0	0	0	0

Dix-huit individus de chaque mélange d'espèce d'insectes bénéfiques ont été ajoutés à une boîte afin d'être testés (22 ± 1 °C; HR : $55 \pm 10\%$; photopériode de 16 L: 8 O). L'ajout des prédateurs a été fait le 3^{ème} jour de l'expérience et l'ajout des femelles parasitoïdes (3-5 jours d'âge et accouplées) a été fait le 9^{ème} jour.

L'expérience a été réalisée avec huit répétitions pour chaque traitement et un traitement témoin. Après 15 jours (temps requis pour le développement d'un cycle de vie complet de *D. suzukii* sous les conditions de laboratoire), les prédateurs, les parasitoïdes, larves, pupes et adultes de *D. suzukii* vivants ont été comptabilisés. Le plat de plastique était immergé dans l'eau pour récupérer les individus par flottation sans les abîmer et pour faciliter leur décompte. Toutes les pupes retrouvées dans les différents traitements ont été placées pendant 35 jours dans une plaque Elisa à raison d'une puce par puit pour observer l'émergence des *D. suzukii* ou des parasitoïdes.

4.2.3 Efficacité en conditions semi-naturelles sous serres

L'expérience en conditions semi-naturelles a été réalisée dans les complexes serricoles d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Vineland en Ontario. Les plants utilisés étaient des framboisiers 'Autumn Britten' issues d'une plantation extérieur et ensuite plantées en pot de 12 L et arrosés manuellement. La fertilisation des framboisiers était assurée par du fertilisant 14-14-14. Les plants avaient pas été pulvérisés avec du MOVENTO avant la réalisation des tests pour contrôler des cochenilles. Chaque plant de framboisier était mis dans une cage de 60 x 60 x 180 cm de haut, couverte d'une mousseline ayant une maille de 160 µm. Les expériences ont démarré quand les plants avaient des fruits rouges près de la maturité requise pour la récolte. Les traitements étaient les mêmes que ceux décrits dans le tableau 4 ci-dessus, cinq répétitions par traitement ont été réalisés. Cinq femelles de 3 jours et trois mâles accouplés de *D. suzukii* ont été introduits par cage au début de l'expérience. Les prédateurs *O. insidiosus*, *C. carnea* et le parasitoïde *M. raptorellus* ont ensuite été relâchés ensemble dans chaque cage le 3^{ème} jour après le début de l'expérience. Trois semaines de cueillettes de fruits ont ensuite été réalisées tous les lundi, mercredi et vendredi. Tous les fruits collectés étaient mis en incubation pour 15 jours à température ambiante afin que les œufs pondus dans les framboises se développent jusqu'au stade adulte. Les framboises étaient déposées individuellement dans des godets en plastique de 37 mL contenant un coton absorbant et fermés avec un couvercle troué. Les godets étaient ensuite congelés jusqu'à la comptabilisation des individus *D. suzukii* émergés et l'identification de leur sexe.

4.2.4 Analyses des données

Pour les deux expériences, les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel JMP (version 12.0.1, SAS Institute Inc., Cary, Caroline du Nord, États-Unis) et les données ont été testées avec le test de Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus et l'erreur de la variance pour l'homoscédasticité. Pour l'expérience en laboratoire, le nombre de *D. suzukii* vivantes produites, le nombre de pupes saines, le nombre de larves vivantes et la proportion de pupes parasitées par *M. raptorellus* ont été comptabilisés et analysés avec une ANOVA, suivie du test de comparaison multiple DSH de Tukey-Kramer ($p < 0,05$). Pour l'expérience en serres, le nombre de fruits infestés sur la totalité de l'expérience et le nombre moyen d'individus produits par fruit ont été calculés pour les cinq traitements. Les résultats ont été analysés avec une ANOVA, suivie du test de comparaison multiple DSH de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

4.3 RÉSULTATS

4.3.1 Efficacité en laboratoire

Le tableau 8 indique le nombre d'individus vivants observés après 15 jours et qui contribuent à l'augmentation des populations de *D. suzukii*. Les résultats indiquent qu'il y a des différences significatives entre les *D. suzukii* adultes, pupes et larves vivantes retrouvés dans les différents traitements (Adultes : $F=3,88$; $df=4, 35$; $p=0,0103$; Pupes : $F=8,98$; $df=4, 35$; $p<0,0001$; Larves : $F=16,89$; $df=4, 35$; $p<0,0001$) (Tableau 5). Les traitements « Mr + Oi + Cc », « Mr + Cc » et « Mr + Oi » sont ceux produisant le moins de *D. suzukii* adultes (Tukey-Kramer, $p<0,05$). Le nombre de pupes saines de *D. suzukii* produites a été significativement moins élevé dans les traitements « Mr + Oi + Cc » et « Mr + Oi » (Tukey-Kramer, $p < 0,05$). Enfin toutes les combinaisons ont produit significativement moins de larves de *D. suzukii* que le témoin (Tuckey-Kramer, $p < 0,05$).

Tableau 5 : Nombre de *D. suzukii* adultes, pupes et larves vivantes retrouvés dans les différents traitements.

Traitements	Nombre de <i>D. suzukii</i> vivantes	Nombre de pupes de <i>D. suzukii</i> saines	Nombre de larves de <i>D. suzukii</i> vivantes
3 espèces (Mr + Oi+Cc)	12,9 ± 4,7 b	83,6 ± 24,8 c	18,0 ± 28,9 b
2 espèces (Mr+Cc)	15,9 ± 4,3 b	120,6 ± 41,1 bc	49,4 ± 27,1 b
2 espèces (Mr+ Oi)	15,4 ± 8,3 b	99,1 ± 38,5 c	57,4 ± 33,4 b
2 espèces (Oi + Cc)	17,9 ± 10,2 ab	168,1 ± 54,4 b	66,5 ± 39,4 b
Témoin	27,8 ± 11,6 a	239,4 ± 51,4 a	126,2 ± 52,1 a

Mr : *M. raptorellus*; Cc : *C. carnea*; Oi: *O. insidiosus*. Des lettres différentes dans une même colonne indiquent des différences avec un test HSD de Tukey-Kramer ($p < 0,05$).

Parmi les pupes échantillonnées dans l'expérience, il y avait une proportion de $0,35 \pm 0,13$, $0,39 \pm 0,16$ et $0,40 \pm 0,19$ pupes parasitées par *M. raptorellus* dans les traitements « Mr+Oi+ Cc », « Mr + Cc » et « Mr + Oi » respectivement. Ces résultats ne différaient pas significativement entre eux ($F=0,25$; $df=2, 21$; $p=0,7808$).

4.3.2 Efficacité en conditions semi-naturelles sous serres

Les essais en conditions semi-naturelles montrent que durant les 3 semaines de récolte de fruits dans les cages, la proportion de fruits infestés est significativement différente pour le traitement « 9 Mr + 9 Oi » comparativement aux autres traitements (Anova : $F = 9,37$, $df = 4$, $p < 0,0001$) (Tableau 6). En effet, l'ajout de *M. raptorellus* et *O. insidiosus* ont permis de réduire 37% le nombre de fruits infestés comparativement au témoin. Il y avait en moyenne 4,4 individus *D. suzukii* produit par framboise infestée dans le traitement « 9 Mr + 9 Oi » ce qui était significativement différent des traitements « 9 Mr + 9 Cc », « 9 Oi + 9 Cc » et témoin (Anova : $F = 13,88$, $df = 4$, $p < 0,0001$).

Tableau 6 : Proportion de fruits infestés par *D. suzukii* après une incubation de 15 jours. Des lettres différentes indiquent une différence significative avec un test HSD de Tukey-Kramer ($p<0,05$).

Traitements	Pourcentage de fruits infestés par <i>D. suzukii</i>
6 Mr + 6 Oi + 6 Cc	$80,02 \pm 4,30$ a
9 Mr + 9 Oi	$46,14 \pm 6,70$ b
9 Mr + 9 Cc	$85,26 \pm 3,50$ a
9 Oi + 9 Cc	$74,23 \pm 4,60$ a
Témoin	$73,91 \pm 5,80$ a

4.4 CONCLUSION

Les deux expériences ont démontré que les combinaisons efficaces en laboratoire pour réduire les populations de *D. suzukii* sont différentes une fois les lâchers réalisés en cages en serres. En effet, en laboratoire, la combinaison à trois espèces était celle qui a réduit le plus les différents stades de *D. suzukii* par rapport au témoin. Cependant, en serres, c'est la combinaison de *M. raptorellus* et *O. insidiosus* qui était la plus efficace pour réduire les infestations des fruits. Évidemment, les populations résiduelles dans les expériences sont extrêmement élevées et ne peuvent refléter une situation souhaitable chez un producteur. Les conditions confinées de l'expérience permettent de mettre en évidence des différences marquées pour départager les combinaisons les plus prometteuses. N'ayant pas réalisé d'observation comportementale des trois ennemis naturels, il est très difficile de proposer des hypothèses explicatives des résultats. Les conditions de températures plus chaudes en serres, la présence de proies alternatives (thrips) et la complexité de la plante vs des fruits en condition d'arènes restreintes en laboratoire peuvent probablement avoir joué un rôle dans les différences observées. En effet, une fois les ennemis naturels relâchés sur un plant, l'architecture de la plante a un impact important sur la capacité de recherche des proies (Grevstad et Klepetka 1992; Gagnon et Brodeur 2014). Pour la suite des expériences, seule la combinaison de *M. raptorellus* et *O. insidiosus* a été conservée considérant les résultats positifs de cette combinaison en expérience sous cages en serres.

5 VOLET 4. RÉPONSE FONCTIONNELLE DES ENNEMIS NATURELS

5.1 OBJECTIF

L'objectif de ce volet était d'étudier la réponse des ennemis naturels *O. insidiosus* et *M. raptorellus* à la densité de *D. suzukii*, notamment des œufs pour le prédateur et des pupes pour le parasitoïde.

5.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

5.2.1 Les colonies d'insectes

Les *D. sukuzii* proviennent d'une colonie maintenue à 23 ± 1 °C; HR : $50 \pm 10\%$; photopériode de 16 L: 8 O dans des cages de plexiglass déposées dans une chambre de croissance de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, Québec. Les œufs sont pondus pendant 48 h dans des framboises placées sur 350 g de diète artificielle utilisée par les larves pour se nourrir et former leurs pupes. La diète consiste en un mélange de 70 g de levure de bière, 150 g de poudre de carotte, de 2,5 g de benzoate de sodium, de 2 g de méthylparaben, de 50 mL de 1N HCl et de 800 mL d'eau distillée. Les adultes de *D. sukuzii* sont nourris avec un mélange de sucre et de levure de bière alimentaire en flocon.

Les parasitoïdes *M. raptorellus* ont été acheté à Bugs for Bugs (Guelph, ON, Canada) et étaient élevés sur des pupes de mouches domestiques *M. domestica*. Les parasitoïdes ont été triés selon le sexe puis transférés dans une cage de plexiglass avec une source d'eau et de sucre jusqu'à leur utilisation pour le projet. Les femelles étaient âgées minimalement de 3 à 4 jours pour l'expérience. Les prédateurs adultes *O. insidiosus* ont été achetés à PlantProducts (Leamington, ON, Canada) et maintenus au frais dans leur emballage pendant une journée avant leur utilisation puis mis à jeun pendant 24h.

5.2.2 Réponse à la densité de proies

Les densités de proies de *D. sukuzii* testées étaient basées sur les résultats des précédents volets et indiquées dans le tableau 7. Dans un plat de plastique de 10 cm de diamètre (177 mL) les œufs ou pupes étaient placés sur un morceau de papier noir humide de 5 cm². Les œufs ont été récoltés grâce à un site de ponte composé de confiture de fraises placé dans les cages d'élevage de *D. sukuzii* de 8 h à 10 h le matin de l'expérience. Les œufs étaient ensuite délicatement extraits de la confiture, rincés et ensuite déposés sur le papier humide. Les pupes récoltées deux jours avant l'expérience ont été maintenues au froid jusqu'au moment de l'expérience pour ensuite les placer sur le papier humide. Une femelle de *M. raptorellus* ou un adulte d'*O. insidiosus* ont été introduits dans chaque boîte contenant respectivement des pupes ou des œufs de *D. sukuzii*. Les boîtes étaient ensuite placées pour 24h à 22 ± 1 °C; HR : $55 \pm 10\%$, photopériode de 16 L: 8 O.

L'expérience a été réalisée en deux blocs temporels, un bloc avec le parasitoïde et un bloc avec le prédateur le tout avec douze répétitions pour chaque traitement et un traitement témoin pour chaque bloc. Après 24h, les ennemis naturels ont été retirés et les œufs éclos/mangés ont été comptabilisés. La différence entre le nombre d'œufs éclos/mangés dans les boîtes de prédateur a été soustrait au nombre d'œufs éclos/mangés dans les boîtes témoins pour obtenir la consommation journalière d'*O. insidiosus*. Pour les pupes des boîtes avec *M. raptorellus*, elles ont été placées pendant 35 jours dans une plaque Elisa à raison d'une puppe par puit pour observer l'émergence des *D. sukuzii* ou des parasitoïdes. Le nombre de pupes parasitées avec un parasitoïde émergé ou resté dans la puppe a été comptabilisé, ainsi que le nombre de *D. sukuzii* qui ont émergés.

Tableau 7 : Densité de *D. sukuzii* sous forme d'œuf ou de puppe offerts aux ennemis naturels *O. insidiosus* et *M. raptorellus*

Ennemis naturels	Œufs de <i>D. sukuzii</i>	Pupes de <i>D. sukuzii</i>
<i>Orius insidiosus</i>	6	-
	12	-
	18	-
	24	-
	30	-
<i>Muscidifura x raptorellus</i>	-	10
	-	20
	-	30

	-	40
	-	50

5.3 RÉSULTATS

Les résultats indiquent que le prédateur *O. insidiosus* mange un maximum de 5,6 œufs de *D. sukukii* en 24h. Le début du plateau de consommation des œufs a été atteint pour la densité de 30 œufs de *D. sukukii* (Figure 8) alors que pour le parasitoïde *M. raptorellus*, c'est un maximum de 8,2 pupes de *D. sukukii* qui ont été parasitées (Figure 9). Dans nos expériences avec *M. raptorellus*, un maximum de 6 femelles sur les 12 répétitions ont parasité des pupes de *D. sukukii* et donc plusieurs femelles n'ont jamais pondu en 24h.

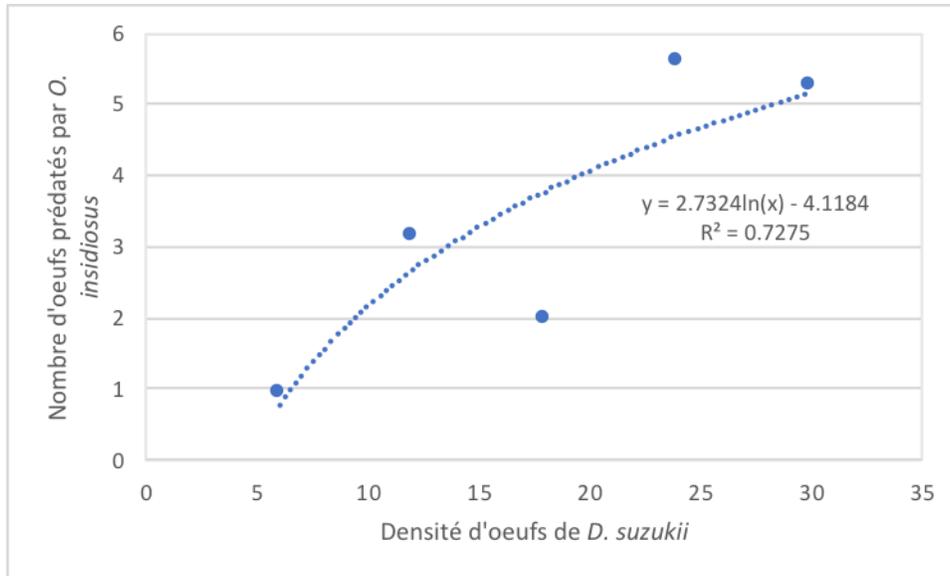


Figure 8 : Nombre d'œufs de *D. sukukii* consommés par *O. insidiosus* en fonction de la densité d'œufs offerts en 24 h.

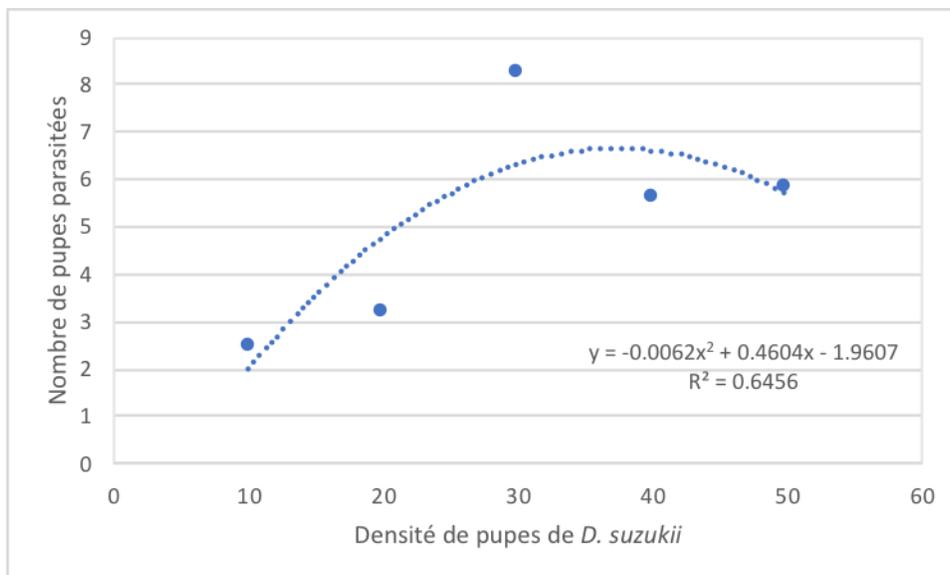


Figure 9 : Nombre de pupes parasitées par *M. raptorellus* en fonction de la densité de pupes de *D. sukukii* offertes en 24 h.

5.4 CONCLUSION

La réponse fonctionnelle d'*O. insidiosus* est de type II, cela signifie que le nombre de proies consommées par *O. insidiosus* augmente d'abord rapidement lorsque l'effectif de la proie augmente, mais atteint ensuite un plateau. Nos résultats semblent suivre cette tendance puisqu'à partir de 24 œufs, la consommation d'*O. insidiosus* a cessé d'augmenter. La réponse fonctionnelle d'*Orius insidiosus* est donc modulée par la plante sur laquelle le prédateur se trouve (Coll et Ridgway 1995) et la densité de proies qui lui est présentée (Isenhour et Yeorgan 1981, McCaffrey et Horsburgh 1986, Saucedo-Gonzalez et Reyes-Villanueva 1987, Isenhour *et al.* 1990). Pour le parasitoïde *M. raptorellus*, les résultats sont similaires. Dans une expérience de Legner (1967), l'émergence de la progéniture pondue par *M. raptorellus*, atteint un palier à 20 pupes parasitées alors que Morgan *et al.* 1979 reportent un palier à 15 pupes et Mann *et al.* (1990) entre 10 et 20 pupes parasitées. Le nombre maximum de pupes de mouche tuées par *M. raptorellus* est de 12 (Morgan *et al.* 1979) à 13 pupes (Mann *et al.* 1990). Ces résultats sont largement supérieurs à ce que nous observons dans nos expériences. Ces résultats indiquent que la consommation d'*O. insidiosus* est relativement faible même si les œufs sont facilement accessibles en étant pas enfouis dans une framboise. À l'instar d'*O. insidiosus* qui consomme peu d'œufs, *M. raptorellus* parasite peu de pupes en 24h. Cela implique que des recherches doivent être poursuivies pour améliorer l'efficacité de ces prédateurs et comprendre leur comportement pour maximiser leur impact sur *D. suzukii*.

6 STRATÉGIE DE CONTRÔLE DE *D. SUZUKII* EN CAGE SOUS CONDITIONS SEMI-NATURELLES

6.1 OBJECTIF

L'objectif de ce volet était de tester différentes stratégies de contrôle de *D. suzukii* en milieu semi-naturel sous abris avec comme culture la framboise d'automne. L'expérience qui s'est déroulée en cage expérimentale voulait comparer trois stratégies de contrôle à un témoin.

6.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

6.2.1 Les colonies d'insectes

Les *D. suzukii* proviennent d'une colonie maintenue à 23 ± 1 °C; HR : $50 \pm 10\%$; photopériode de 16 L: 8 O dans des cages de plexiglass déposées dans une chambre de croissance de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, Québec. Les œufs sont pondus pendant 48 h dans des framboises placées sur 350 g de diète artificielle utilisée par les larves pour se nourrir et former leurs pupes. La diète consiste en un mélange de 70 g de levure de bière, 150 g de poudre de carotte, de 2,5 g de benzoate de sodium, de 2 g de méthylparaben, de 50 mL de 1 NHCl et de 800 mL d'eau distillée. Les adultes de *D. suzukii* sont nourris avec un mélange de sucre et de levure de bière alimentaire en flocon.

Les parasitoïdes *M. raptorellus* ont été achetés à Bugs for Bugs (Guelph, ON, Canada) et ont été élevés sur des pupes de mouches domestiques *M. domestica*. Les parasitoïdes ont été triés selon le sexe puis transférés dans une cage de plexiglass avec de l'eau et du sucre jusqu'à leur utilisation pour le projet. Les femelles étaient âgées minimalement de 3 à 4 jours pour l'expérience. Les adultes *O. insidiosus* ont été achetés à PlantProducts (Leamington, ON, Canada) et maintenus au frais pendant une journée avant leur utilisation.

6.2.2 Évaluation de l'efficacité de trois stratégies de lutte

L'expérience a été réalisée dans des tunnels plastiques Harnois (9 x 30 mètres) de la plateforme en agriculture biologique de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville. Les plants utilisés étaient des framboisiers de variété Polana âgés de 2 années plantés en pot de 12 L et irrigués par aspersion. La fertilisation des framboisiers était assurée par des doses d'acti-sol 5-2-4, déposées hebdomadairement à la surface du sol des pots et un ajout mensuel de farine de plume, de luzerne et poudre d'os. Les plants ont été protégés avec des applications de bioacaricides pour contrôler les populations de *Tetranychus urticae* avant le début de l'expérience. Les derniers traitements ont été réalisés une semaine avant le début de l'expérience. Trois plants de framboisiers étaient mis dans une cage de dimension 1,3 m x 2

m x 2 m de haut, couverte d'un filet ayant une maille de 25 gr/m². Le dispositif était en blocs aléatoires complets avec 5 répétitions par traitement (Figure 10). Les expériences ont démarré quand les plants avaient des fruits rouges près de la maturité requise pour la récolte. Cinq femelles et trois mâles de 3 jours accouplés de *D. suzukii* ont été introduits par cage pour reproduire une infestation naturelle. Les différents traitements testés étaient :

- 1-Témoin sans biopesticides ou ennemis naturels (Témoin);
- 2-Trois introductions de deux ennemis naturels aux 7 jours (Mr + Oi);
- 3-Trois traitements de biopesticide Entrust aux 7 jours (Entrust);
- 4-Un traitement de biopesticide Entrust la première semaine puis subséquemment deux introductions de deux ennemis naturels aux 7 jours (Entrust + Mr + Oi).

Neuf individus de chaque espèce d'ennemis naturels pour un total de 18 ennemis naturels, ont été relâchés aux pieds des trois plants de framboisiers. Ils ont été relâchés le 3^{ème} jour après l'introduction des DAT dans les cages des traitements « Mr + Oi » (Figure 11). Le traitement de biopesticide était aussi réalisé le 3^{ème} jour après l'introduction des DAT dans les traitements « Entrust » et « Entrust + Mr + Oi ». Sept et 14 jours plus tard les introductions d'ennemis naturels ont été renouvelés dans les traitements « Mr + Oi » et « Entrust + Mr + Oi » et le biopesticide a été appliqué dans le traitement « Entrust ». Onze récoltes de framboises ont été réalisées sur un peu plus de trois semaines tous les lundi, mercredi et vendredi entre le 6 et le 30 septembre 2019. Sur tous les fruits collectés un maximum de 60 fruits choisis au hasard par cage étaient mis en incubation pour 15 jours à 21 ± 1 °C Les fruits étaient déposés individuellement dans des godets de 37 mL contenant un coton absorbant et fermé avec un couvercle troué jusqu'à ce que les œufs de *D. suzukii* pondus dans les framboises atteignent le stade adulte. Les godets étaient ensuite congelés jusqu'à leur observation pour dénombrer les *D. suzukii* émergés et identifier leur sexe.



Figure 10 : Dispositif expérimental utilisé pour l'expérience en cage en 2019

Septembre 2019

Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Légende

Récolte =  introduction d'ennemis naturels =  bio insecticide = 

Figure 11 : Calendrier des étapes de réalisation de l'expérience en cage en 2019

6.2.3 Analyses des données

Les pourcentages de fruits infestés ont été analysés à l'aide du logiciel JMP (version 12.0.1, SAS Institute Inc., Cary, Caroline du Nord, États-Unis). Le pourcentage a été obtenu en divisant le nombre de fruits observé avec au moins une DAT émergée par le nombre de fruit mis en godet par cage, par traitement pour chaque récolte. Comme les résidus n'étaient pas distribués selon la loi normale avec un test de Shapiro-Wilk et l'homoscédasticité de la variance n'était pas rencontrée, nous avons procédé avec des analyses non paramétriques de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) suivi du test de comparaison de Wilcoxon ($p < 0,01$).

6.3 RÉSULTATS

Les résultats montrent que les traitements « Entrust » et « Entrust + Mr + Oi » sont significativement différents du traitement « Mr + Oi » et « Témoin » (Wilcoxon $p < 0,001$) (Tableau 8). L'introduction des deux ennemis naturels seuls ne permet pas de réduire de manière significative le nombre de fruits infestés comparativement au témoin puisqu'en moyenne 55% des fruits sont infestés dans le traitement « Mr + Oi » comparativement à 51% pour le témoin (Figure 12). Même si le tableau 10 indique 2,7% de fruits infestés dans le traitement « Entrust + Mr + Oi » et 1,7% dans le traitement « Entrust », l'effet des ennemis naturels n'a pas pu réellement être évalué. En effet, 7 jours suite au premier traitement biopesticide, les populations de DAT observées étaient quasi nulles dans les parcelles « Entrust + Mr + Oi » (Figure 12). Deux mâles et une femelle ont été observés dans deux fruits incubés de ce traitement juste avant le lâcher des ennemis naturels. Les cueillettes successives aux deux jours ont probablement diminué drastiquement les chances de développement de populations de *D. suzukii* et les chances d'observer l'effet des ennemis naturels.

Tableau 8 : Pourcentage moyen \pm EM de fruits infestés dans les quatre traitements sur toute la durée de l'expérience en cage en 2019. Des lettres différentes indiquent une différence avec un test de Wilcoxon ($p < 0,01$)

Traitements	Pourcentage de fruits infestés sur la saison
Entrust + Mr + Oi	2,68 \pm 1,12 b
Mr + Oi	55,52 \pm 2,33 a

Entrust	1,72 ± 0,78 b
Témoin	51,3 ± 2,53 a

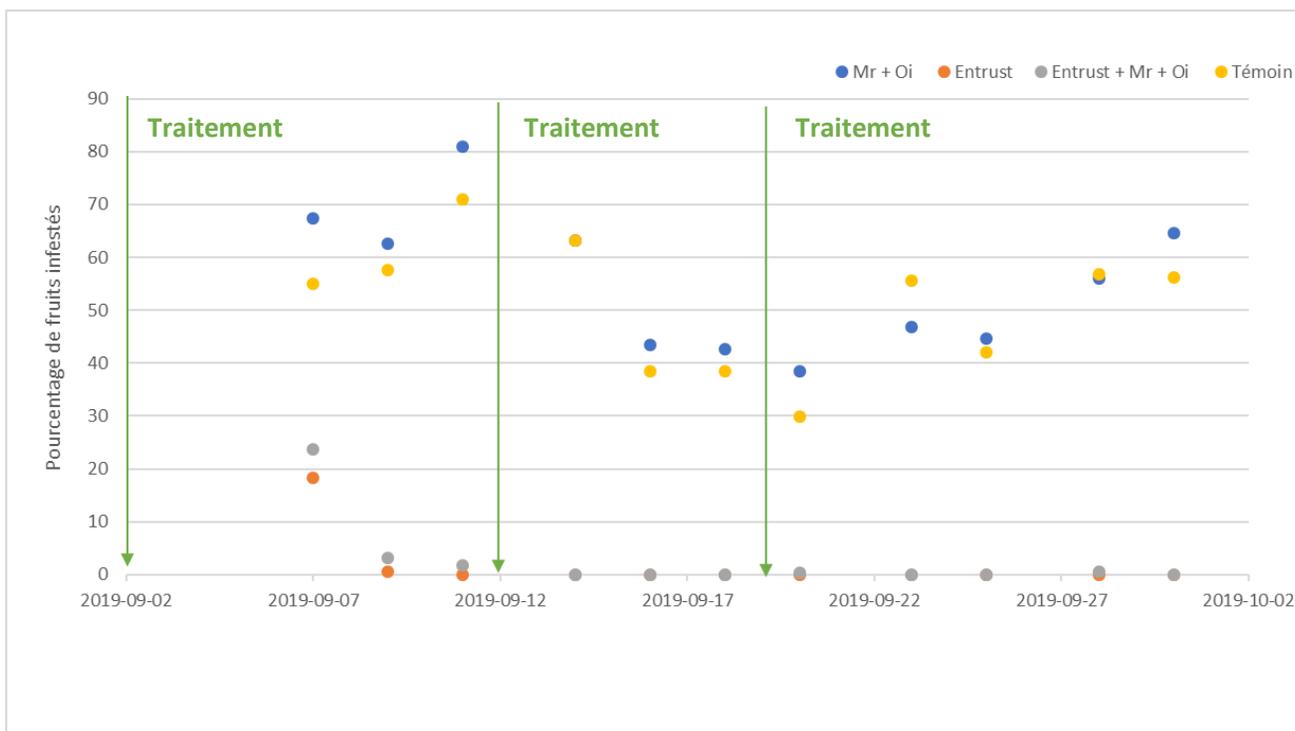


Figure 12 : Évolution du pourcentage de fruits infestés dans les quatre traitements durant les expériences en cage en 2019.

6.4 CONCLUSION

Les résultats de cette expérience montrent que l'introduction des deux ennemis naturels *M. raptorellus* et *O. insidiosus* pour contrôler les populations de DAT n'a pas fonctionné. Plusieurs facteurs pourraient venir expliquer ces résultats :

- 1-La quantité d'individus introduits : aucun test n'a été réalisé au préalable et les quantités introduites dérivait des expériences réalisées en serres. Actuellement les recommandations d'introduction des fabricants d'ennemis naturels sont adaptées pour d'autres types de proies (tétranyques, thrips, mouches d'élevage).
- 2-La présence de proie alternative telle que les tétranyques à deux points et les thrips peuvent également expliquer les faibles résultats. En effet les thrips et les tétranyques à deux points étant des proies mobiles facilement repérables par le prédateur *O. insidiosus* s'est peut-être restreints à la recherche de proies sur les feuilles et n'a pas exploré les fruits. D'autres tests seraient à planifier pour comprendre leur comportement et tester les densités de prédateurs à introduire par plants.

7 CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet a permis de dégager l'efficacité de différents ennemis naturels commerciaux pour lutter contre la DAT. La punaise *O. insidiosus*, la larve *C. carnea* et le parasitoïde *M. raptorellus* étaient les trois candidats les plus prometteurs. Les essais de toxicité en laboratoire avec différents biopesticides montrent que l'ENTRUST est le biopesticide modérément toxique pour ces trois ennemis naturels alors que tous les autres (SAFER'S, TROUNCE, BIOPROTEC CAF, PYGANIC) sont faiblement toxiques ce qui suggère leur compatibilité avec ces ennemis naturels dans une régie biologique ciblant d'autres ravageurs. Des expériences en laboratoire et en serres sur des plants de framboisiers ont ensuite pu démontrer que la combinaison *O. insidiosus* et *M. raptorellus* est celle qui diminue le plus les populations de DAT jusqu'à au moins 15 jours après leur introduction. La punaise *O. insidiosus* consomme essentiellement des œufs de DAT pour un maximum de 5,6 œufs par 24h alors que *M. raptorellus* parasite un maximum de 8,2 pupes par 24h dépendamment de la densité en DAT offerte. La dernière étape de cette étude qui était de tester des stratégies en

conditions semi-naturelles n'a cependant pas permis de démontrer un effet de la combinaison *O. insidiosus* et *M. raptorellus* ce qui dicte de poursuivre les études pour détailler le comportement de ces ennemis naturels en conditions semi-naturelles et naturelles et effectuer des tests sur les densités à introduire pour obtenir un niveau de contrôle acceptable.

8 RÉFÉRENCES

- ACIA. 2012. *Drosophila suzukii* (drosophile aux ailes tachetées). Document de gestion du risque. Parasites réglementés. DGR-11-01. [En ligne] <http://www.inspection.gc.ca/vegetaux/phytoravageurs-especes-envahissantes/directives/gestion-du-risque/dgr-11-01/fra/1330738873775/1330738972893>. Page consultée le 28 novembre 2019.
- Boller, E. F., Vogt, H., Ternes, P. et Malavolta, C. 2006. Working document on selectivity of pesticides (2005). Internal newsletter issued by the publication commission for the IOBC/wrps council and executive committee issue. 40.
- Bonneau, P., Renkema, J., Fournier, V. et Firlej, A. 2019. Ability of *Muscidifurax raptorellus* and Other Parasitoids and Predators to Control *Drosophila suzukii* Populations in Raspberries in the Laboratory. *Insects* 10(3) : 68.
- Bruno, J.F., et O'Connor, M.I. 2005. Cascading effects of predator diversity and omnivory in a marine food web. *Ecol. Lett.* 8: 1048–1056.
- Chabert, S., Allemand, R., Poyet, M., Eslin, P. et Gibert, P. 2012. Ability of European parasitoids (Hymenoptera) to control a new invasive Asiatic pest, *Drosophila suzukii*. *Biol. Control* 63(1) : 40-47.
- Chabert, S., Allemand, R., Poyet, M., Ris, N. et Gibert, P. 2013. *Drosophila suzukii*, vers une lutte biologique contre ce ravageur des fruits rouges. *Phytoma*. 660 : 34-38.
- Cini, A., Ioriatti, C. et Anfora, G. 2012. A review of the invasion of *Drosophila suzukii* in Europe and a draft research agenda for integrated pest management. *Bull. Insect.* 65(1) : 149-160.
- Coll, M. et Ridgway, R.L. 1995. Functional and Numerical Responses of *Orius insidiosus* (Heteroptera: Anthocoridae) to Its Prey in Different Vegetable Crops. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 88 :732-738.
- Cormier, D., Veilleux, J. et Firlej, A. 2015. Exclusion net to control spotted wing *Drosophila* in blueberry fields. *IOBC-WPRS Bull.* 109 : 181-184.
- CRAAQ.2019. Guide traitements phytosanitaires 2019- Framboisier. 61p.
- Cuthbertson, A. G., Blackburn, L. F., et Audsley, N. 2014. Efficacy of commercially available invertebrate predators against *Drosophila suzukii*. *Insects* 5(4) 952-960.
- Daane, K.M., Wang, X.-G., Biondi, A., Miller, B., Miller, J.C., Riedl, H., Shearer, P.W., Guerrieri, E., Giorgini, M., Buffington, M., van Achterberg, K., Song, Y., Kang, T., Yi, H., Jung, C., Lee, D. W., Chung, B.-K., Hoelmer, K. A. et Walton, V. M. 2016. First exploration of parasitoids of *Drosophila suzukii* in South Korea as potential classical biological agents. *J. Pest Sci.* 89(3) : 823-835.
- Finke, D. L. et Snyder, W. E. 2008. Niche partitioning increases resource exploitation by diverse communities. *Science* 321(5895): 1488-1490.
- Firlej, A. et F. Vanoosthuysse. 2017. La drosophile à ailes tachetées, un ravageur des petits fruits au Québec. Synthèse bibliographique. IRDA et partenaires. 93 p.
- Firlej, A., E. Ménard, S. Tellier, C. Lacroix, G.-A. Landry, F. Demers & D. Giroux .2019. Production fruitière intégrée 2019 – Framboise. 2 p.

- Follett, P. A., Swedman, A. et Price, D. K. 2014. Postharvest irradiation treatment for quarantine control of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in fresh commodities. *J. Econ. Entomol.* 107(3): 964-969.
- Gabarra, R., Riudavets, J. , Rodríguez, G.A., Pujade-Villar, J. et Arnó, J. 2015. Prospects for the biological control of *Drosophila suzukii*. *Biocontrol* 60(3) : 331-339.
- Gagnon, A.-E. et Brodeur, J. 2014. Impact of plant architecture and extraguild prey density on intraguild predation in an agroecosystem. *Entomol. Exp. Appl.* 152: 165-173.
- Godfray, H.C.J. 1994. *Parasitoids: Behavioral and Evolutionary Ecology*; Princeton University Press Books: Princeton, NJ, USA. 473 p.
- Grevstad, F.S. et Klepetka, B.W. 1992. The influence of plant architecture on the foraging efficiencies of a suite of ladybird beetles feeding on aphids. *Oecologia* 92: 399–404.
- Hampton, E., Koski, C., Barsoian, O., Faubert, H., Cowles, R.S. et Alm, S.R. 2014. Use of early ripening cultivars to avoid infestation and mass trapping to manage *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in *Vaccinium corymbosum* (Ericales: Ericaceae). *J. Econ. Entomol.* 107(5) : 1849-1857.
- Hoffmann, M.P. et Frodsham, A.C. 1993. *Natural Enemies of Vegetable Insect Pests*. Cornell University, Ithaca, NY. 63 p.
- Isenhour, D. J., Layton, R. C. et Wiseman, B. R. 1990. Potential of adult *Orius insidiosus* [Hemiptera: Anthocoridae] as a predator of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [Lepidoptera: Noctuidae]. *Entomophaga* 35: 269-275.
- Isenhour, D. J. et Yeargan, K. V. 1981. Predation by *Orius insidiosus* on the soybean thrips, *Sericothrips variabilis*: effect of prey stage and density. *Environ. Entomol.* 10: 496-500.
- Kanzawa, T. 1939. Studies on *Drosophila suzukii* Mats. Kofu, Yamanashi Agricultural Experiment Station 49 p. (abstr.). *Rev. Appl. Entomol.* 29 : 622.
- Kasuya, N., Mitsui, H., Ideo, S., Watada, M. et Kimura, M. T. 2013. Ecological, morphological and molecular studies on *Ganaspis individuals* (Hymenoptera: Figitidae) attacking *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Appl. Entomol. Zool.* 48(1) :87-92.
- Lee, J.C., Bruck, D.J., Curry, H., Edwards, D., Haviland, D.R., Van Steenwyk, R.A, et Yorgey, B.M. 2011. The susceptibility of small fruits and cherries to the spotted-wing drosophila, *Drosophila suzukii*. *Pest Manag. Sci.* 67(11) : 1358-1367.
- Legner, E. F. et Gerling, D. 1967. Host-Feeding and Oviposition on *Musca domestica* by *Spalangia cameroni*, *Nasonia vitripennis*, and *Muscidifurax raptor* (Hymenoptera: Pteromalidae) Influences Their Longevity and Fecundity. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 60(3) : 678–691.
- Letourneau, D. K., Jedlicka, J. A., Bothwell, S. G., et Moreno, C. R. 2009. Effects of natural enemy biodiversity on the suppression of arthropod herbivores in terrestrial ecosystems. *Annu. Review Ecol. Evol. Syst.* 40 : 573-592.
- Lin, Q.-C., Zhai, Y.-F., Zhang, A.-S., Men, X.-Y., Zhang, X.-Y, Zalom, F.G., Zhou, C.-G. et Yu, Y. 2014. Comparative developmental times and laboratory life tables for *Drosophila suzukii* and *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae). *Florida Entomol.* 97(4) : 1434-1442.
- Lopez, J. D., Ridgway, R. L., et Pinnelli, P. E. 1976. Comparative efficacy of four insect predators of the bollworm and tobacco budworm. *Environ. Entomol.* 5 :1160–1164.
- Mann, J.A., Stinner, R.E. et Axtell R.C. 1990. Parasitism of house fly (*Musca domestica*) pupae by four species of Pteromalidae (Hymenoptera): effects of host-parasitoid densities and host distribution. *Med. Vet. Entomol.* 4: 235-243.
- McCaffrey, J. P. et Horsburgh, R. L. 1986. Functional response of *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae) to the European red mite, *Panonychus ulmi* (Acari: Tetranychidae), at different constant temperatures. *Environ. Entomol.* 15: 532-535.

- McGregor, R. R., Gillespie, D. R., Quiring, D. M., et Foisy, M. R. 1999. Potential use of *Dicyphus hesperus* Knight (Heteroptera: Miridae) for biological control of pests of greenhouse tomatoes. *Biol. Control* 16(1): 104-110.
- Miller, B., Anfora, G., Buffington, M., Daane, K. M., Dalton, D. T., Hoelmer, K. M. et Rossi-Stacconi, M. V. 2015. Seasonal occurrence of resident parasitoids associated with *Drosophila suzukii* in two small fruit production regions of Italy and the USA. *Bull. Insectology* 68(2) : 255-263.
- Mitsui, H. et Kimura, M.T. 2010. Distribution, abundance and host association of two parasitoid species attacking frugivorous drosophilid larvae in central Japan. *Eur. J. Entomol.* 107(4) : 535.
- Moreno Carrillo, G., Rodriguez Velez, B., Sanchez Gonzalez, J.A. et Bernal, H.C.A. 2015. Trapping and recording of the parasitoid *Pachycrepoideus vindemmiae* (Rondani)(Hymenoptera: Pteromalidae) of *Drosophila suzukii* (Matsumura)(Diptera: Drosophilidae) in Mexico. *Southwest. Entomol.* 40(1) : 199-203.
- Morgan, P.B. Weidhaas, D.E. et LaBrecque, G.C. 1979. Host-Parasite Relationship of the House Fly, *Musca domestica* L., and the Microhymenopteran Pupal Parasite, *Muscidifurax raptor* Girault and Sanders (Diptera: Muscidae and Hymenoptera: Pteromalidae). *J. Kansas Entomol. Soc.* 52(2): 276-281.
- Nomano, F. Y., Mitsui, H. et Kimura, M. T. 2015. Capacity of Japanese *Asobara* species (Hymenoptera; Braconidae) to parasitize a fruit pest *Drosophila suzukii* (Diptera; Drosophilidae). *J. Appl. Entomol.* 139(1-2) : 105-113.
- Northfield, T. D., Crowder, D. W., Takizawa, T., et Snyder, W. E. 2014. Pairwise interactions between functional groups improve biological control. *Biol. control.* 78: 49-54.
- Polis, G.A. et Holt, R.D., 1992. Intraguild predation – the dynamics of complex trophic interactions. *Trends Ecol. Evol.* 7: 151–154.
- Porter A. 2009. IRAC Susceptibility Test Methods Series – Method No: 007. Version: 3. http://www.irac-online.org/content/uploads/Method_007_v3_june09.pdf. Consulté le 28 novembre 2019.
- Poyet, M., Havard, S., Prevost, G., Chabrierie, O., Doury, G., Gibert, P. et Eslin, P. 2013. Resistance of *Drosophila suzukii* to the larval parasitoids *Leptopilina heterotoma* and *Asobara japonica* is related to haemocyte load. *Physiol. Entomol.* 38(1) : 45-53.
- Renkema, J. M., Telfer, Z., Garipey, T., et Hallett, R. H. 2015. *Dalotia coriaria* as a predator of *Drosophila suzukii* : Functional responses, reduced fruit infestation and molecular diagnostics. *Biol. Control.* 89: 1-10.
- Rossi-Stacconi, M.V., Grassi, A., Dalton, D.T., Miller, B., Ouantar, M., Loni, A., Ioriatti, C., Walton, V.M. et Anfora, G. 2013. First field records of *Pachycrepoideus vindemmiae* as a parasitoid of *Drosophila suzukii* in European and Oregon small fruit production areas. *Entomologia* 1(1) : 11-16.
- Rueda, L. M., et Axtell, R. C. 1985. Guide to common species of pupal parasites (Hymenoptera: Pteromalidae) of the house fly and other muscoid flies associated with poultry and livestock manure. North Carolina Agricultural Research Service Technical Bulletin 278.
- SAgE Pesticides. 2019. Traitements phytosanitaires et risques associés. [En ligne] <https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheTraitement>. Page consultée en novembre 2019.
- Saucedo-Gonzalez, J., et Reyes-Villanueva, F. 1987. Respuesta funcional de *Orius insidiosus* [Hemiptera: Anthocoridae] sobre *Caliothrips phaseoli* [Thysanoptera: Thripidae]. *Folia Entomol. Mex.* 71: 27-35.
- Scopes NEA (1969) The potential of *Chrysopa carnea* as a biological control agent of *Myzus persicae* on glasshouse chrysanthemums. *Ann. Appl. Biol.* 64 : 433–439.

Sha, Z. L., Zhu, C. D., Murphy, R. W., et Huang, D. W. 2007. *Diglyphus isaea* (Hymenoptera: Eulophidae): a probable complex of cryptic species that forms an important biological control agent of agromyzid leaf miners. *J. Zool. Syst. Evol. Res.* 45(2) : 128-135.

Sih, A., Englund, G. et Wooster, D. 1998. Emergent impacts of multiple predators on prey. *Trends Ecol. Evol.* 13 : 350-355.

Snyder, W. E., Snyder, G. B., Finke, D. L., et Straub, C. S. 2006. Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecol. letters* 9(7) : 789-796.

Straub, C.S., Finke, D. L. et Snyder, W. E. 2008. Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals? *Biol. Control* 45 (2) : 225–237.

Wang, X.-G., Kaçar, G., Biondi, A. et Daane, K. M. 2016. Life-history and host preference of *Trichopria drosophilae*, a pupal parasitoid of spotted wing drosophila. *BioControl* 61(4) : 387-397.

Woltz, J.M., Donahue, K.M., Bruck, D.J. et Lee, J.C. 2015. Efficacy of commercially available predators, nematodes and fungal entomopathogens for augmentative control of *Drosophila suzukii*. *J. Appl. Entomol.* 139(10) : 759-770.