

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE PIÉGEAGE MASSIF DE LA CHRYSOMÈLE RAYÉE DU
CONCOMBRE DANS LA PRODUCTION BIOLOGIQUE DES CUCURBITACÉES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES BIOLOGIQUES

PAR

JESSEE TINSLAY

PRINTEMPS 2024

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.12-2023). 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 grandement mon directeur de recherche Éric Lucas, qui m'a offert cette opportunité de maîtrise et qui m'a épaulé tout au long de mon projet. Merci à mon co-directeur Pierre Lafontaine pour ses commentaires et son expertise dans le domaine. Merci à Maxime Lefebvre, membre du comité, pour son attention aux détails dans mes travaux écrits et Isabelle Couture, membre du comité, qui m'a aidé sur le terrain et qui fût une excellente source d'expertise, ses conseils et connaissances m'ont permis d'avoir les informations les plus complète sur mon sujet de recherche. Merci à tous de votre soutien.

Merci à Marc Fournier pour son énorme participation dans le projet. Il était toujours présent en cas de besoin et avait des solutions à tous les problèmes. Son expertise et ses conseils sont grandement appréciés. Je n'aurais pas réussi à tout faire sans son aide.

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

Je remercie les étudiants du laboratoire pour l'excellente ambiance que vous créez. L'échange d'idées ainsi que le partage de succès et d'échecs dans cette atmosphère ouverte d'esprit m'ont confirmé que j'étais au bon endroit et que je travaillais pour une bonne cause.

Finalement, merci à ma famille et mes amis de m'encourager dans mes études. Votre appui constant m'a permis d'entreprendre cette merveilleuse opportunité et de devenir la personne que je suis aujourd'hui.

DÉDICACE

Je dédie cet ouvrage à mes parents, qui m'ont toujours appuyé dans ce que j'ai voulu faire.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est le résultat de trois années de travail auprès du laboratoire de lutte biologique de l'UQÀM. Cet ouvrage a été dirigé par Éric Lucas et co-dirigé par Pierre Lafontaine (Carrefour Industriel et Expérimental de Lanaudière), Marc Fournier (UQÀM), Maxime Lefebvre (Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement) et Isabelle Couture (ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec).

Ce projet a été réalisé dans le cadre du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert – Appui au développement expérimental, à l'adaptation technologique et au transfert technologique des connaissances en agroenvironnement avec une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation par l'entremise de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021.

Ce mémoire est composé de trois chapitres dont deux sous forme d'articles scientifiques. Le premier article (chapitre II) a été publié dans la revue *Insects* en mai 2022 et le second article (chapitre III) soumis pour publication dans le *Journal of Economic Entomology* en décembre 2023. Les résultats de cette maîtrise ont été diffusés lors du congrès annuel de la Société d'Entomologie du Québec en 2019, 2020, 2021 et 2022 ainsi qu'aux Vendredis Horticoles de la Montérégie en 2021.

D'autres retombées de ce projet de maîtrise ont été la publication d'un article dans le journal *la Terre de Chez Nous* et dans le magazine *Les Débrouillards* (voir **Annexe 1**). Une capsule vidéo sur la chrysomèle rayée du concombre a aussi été réalisé en collaboration avec le Laboratoire d'Agriculture Urbaine (AU/LAB; voir **Annexe 1**).

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iii
AVANT-PROPOS.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	x
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Concepts biologiques relatifs à l'étude.....	3
1.2.1 Lutte contre les ravageurs	3
1.2.2 Lutte écomonale	10
1.2.3 Une technique de piégeage de masse prometteuse	11
1.3 Système biologique.....	12
1.3.1 Les cucurbitacées.....	12
1.3.2 La chrysomèle rayée du concombre (CRC): <i>Acalymma vittatum</i>	16
1.4 Objectifs et hypothèses.....	20
1.4.1 Objectifs principaux	20
1.4.2 Objectifs et hypothèses de recherches.....	21
CHAPITRE 2 Optimization of a mass trapping method against the striped cucumber beetle <i>Acalymma vittatum</i> in organic cucurbit fields	23
2.1 Résumé/Abstract	23
2.2 Introduction	25
2.3 Materials and methods	27
2.3.1 Study sites and experimental plots.....	27
2.3.2 Pest Control Potential of the Mass Trapping Method	27
2.3.3 Selection of the Optimal Trap (Number and Diameter of Trap Entrances).....	28
2.3.4 Selection of the Optimal Lure	29
2.4 Results.....	29
2.4.1 Pest Control Potential of the Mass Trapping Method	29
2.4.2 Selection of the Optimal Trap (Number and Diameter of Trap Entrances).....	31

2.4.3 Selection of the Optimal Lure	33
2.5 Discussion.....	34
2.6 Acknowledgments.....	37
2.7 References.....	37
CHAPITRE 3 Failure of a mass trapping program against the striped cucumber beetle <i>Acalymma vittatum</i> in organic cucurbit fields	40
3.1 Abstract.....	40
3.2 Introduction	41
3.3 Materials and Method	42
3.3.1 Study sites	42
3.3.1 Trapping experiment	43
3.3.2 Surveying SCB thresholds.....	44
3.1 Results.....	45
3.1.1 Factors influencing average number of SCB per plant	45
3.1.2 Treatment effect on SCB populations.....	46
3.1.3 Economic threshold	47
3.2 Discussion.....	51
3.2.1 Trapping method potential.....	52
3.3 Conclusion	52
3.4 Acknowledgment	53
3.5 References.....	53
CHAPITRE 4 Conclusion générale	57
ANNEXE 1	65
RÉFÉRENCES	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Distribution de la CRC en Amérique du Nord (Sparks et al., 2020).....	1
Figure 1.2 Flétrissement bactérien sur un plant de cucurbitacée (Couture, 2017).....	2
Figure 1.3 Cladogramme des espèces parentés à la CRC (Chrysomelidae: Galerucinae: Luperini: Diabroticina) possédant les résistomes aux pyréthrinés et néonicotinoïdes (<i>D. virgifera virgifera</i> et <i>L. decemlineata</i>) et deux espèces de références (<i>A. glabripennis</i> et <i>T. castaneum</i> ; Sparks et al., 2020).	5
Figure 1.4 (A) <i>Celatoria diabroticae</i> (Gross, 2017); (B) Pupa de <i>Celatoria setosa</i> (Kahl, 2018); (C) <i>Celatoria setosa</i> (Haber et al., 2021); (D) <i>Centistes diabroticae</i> (Haber et al., 2021); (E) <i>C. diabroticae</i> avec une chrysomèle maculée du concombre, <i>Diabrotica undecimpunctata</i> (Haber et al., 2021).	9
Figure 1.5 Ampleur de l'effet des écomones volatiles sur des insectes herbivores basé sur leur (A) sexe, (B) guildes alimentaires, (C) groupe taxonomique, et (D) comportement alimentaire. Les résultats des graphiques correspondent à une méta-analyse d'articles portant sur des expériences de terrain avec des herbivores et des écomones volatiles. Les chiffres au-dessus des barres d'erreur représentent le nombre d'observations utilisées pour calculer l'ampleur de l'effet des écomones dans chaque catégorie (Szendrei et Rodriguez-Saona, 2010).	11
Figure 1.6 Schéma du cycle vital de la chrysomèle rayée du concombre (CRC) (Couture, 2017).....	18
Figure 1.7 Organigramme du développement d'une stratégie de piégeage massif contre la CRC dans la production biologique de cucurbitacées au Québec.....	20
Figure 2.1 Number of SCBs, ladybirds, bees, and hoverflies captured in baited and unbaited traps in cucumber and zucchini plots (ANOVA). (A) SCB—cucumber: $F_{1,106} = 3.94$; $p < 0.05$; zucchini: $F_{1,106} = 2.89$; $p = 0.09$, (B) bees—cucumber: $F_{1,94} = 15.11$; $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 33.54$; $p < 0.001$, (C) ladybirds—cucumber: $F_{1,94} = 3.56$; $p = 0.06$; zucchini: $F_{1,94} = 0.05$; $p = 0.82$, (D) hoverflies—cucumber: $F_{1,94} = 11.80$; $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 8.36$; $p < 0.01$). Asterisks above bars indicate significant differences according to ANOVA tests at $p = 0.05$	30
Figure 2.2 Number of SCBs, ladybirds, bees, and hoverflies captured in different trap types (ANOVA). (A) SCB— $F_{5,499} = 0.85$, $p = 0.49$; (B) bees— $F_{4,503} = 13.78$, $p < 0.001$; (C) ladybirds— $F_{4,500} = 4.31$, $p < 0.01$; (D) hoverflies— $F_{4,501} = 0.96$, $p = 0.43$). Different letters above bars indicate significant differences according to the Tukey HSD test ($p < 0.05$).	32
Figure 2.3 Number of SCBs, ladybirds, bees and hoverflies captured in traps baited with different lures (ANOVA, (A) SCB— $F_{4,505} = 22.02$, $p < 0.001$; (B) bees— $F_{4,505} = 15.55$, $p < 0.001$; (C) ladybirds— $F_{4,505} = 1.55$, $p = 0.19$; (D) hoverflies— $F_{4,505} = 7.49$, $p < 0.001$). Different letters above bars indicate significant differences according to the Tukey HSD test ($p < 0.05$)	34
Figure 3.2 Average number of SCBs per plant in Farnham in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Farnham in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.05$	48

Figure 3.3 Average number of SCBs per plant in Saint-Bruno-de-Montarville in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Saint-Bruno-de-Montarville in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.05$ 49

Figure 3.4 Average number of SCBs per plant in Saint-Nazaire-d'Acton in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Saint-Nazaire-d'Acton in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.0$ 50

Figure 4.1 Ordre de préférence alimentaire des CRC des cucurbitacées plantées dans les parcelles selon Boucher 2007..... 61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Méthodes culturales utilisées contre la CRC.	7
Tableau 1.2 Définitions des différents types de lutte biologique.	8
Tableau 1.3 Production de cucurbitacée et valeur à la ferme, au Québec, en Ontario et au Canada en 2019 (Statistique Canada, 2019).	13
Tableau 1.4 Nombre d'exploitations agricoles cultivant des cucurbitacées par région administratives au Québec en 2017 (Keable, 2018).....	13
Table 3.1 Results of the generalized model of factors, i.e., site, date and year, explaining the average number of striped cucumber beetles (SCB) per plant.....	46
Tableau 4.1 Facteurs expliquant les différentes réponses des six répliques d'année-site.....	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CRC : chrysomèle rayée du concombre

TIC : le 1,2,4-trimethoxybenzène (T), l'indole (I) et le (E)-cinnamaldéhyde (C)

5F : stade où la plante possède 5 feuilles.

RÉSUMÉ

Un des plus importants ravageurs en production de cucurbitacées en Amérique du Nord est la chrysomèle rayée du concombre (CRC) *Acalymma vittatum* (Fabricius), (Coleoptera : Chrysomelidae) capable de causer d'importantes pertes de production dues aux dommages directs qu'elle inflige aux jeunes plants et de transmettre le flétrissement bactérien *Erwinia Tracheiphila* en plus de causer des dommages esthétiques aux fruits. Bien que des méthodes de lutte efficaces en cultures conventionnelles existent, il y a peu d'alternatives disponibles en régie biologique. Les objectifs de ce projet sont i) d'optimiser une technique de piégeage de masse de la CRC pour l'adapter à la production biologique de cucurbitacées en champs au Québec, et ii) d'évaluer la technique de piégeage de masse optimisée.

Pour répondre au premier objectif, en 2019 cinq modèles de pièges et quatre types d'attractifs ont été testés en cultures biologiques de cucurbitacées. À toutes les semaines au cours de la saison de croissance des cucurbitacées, les CRC capturées ont été dénombrées et les insectes non-cibles capturés ont été identifiés et dénombrés. Les résultats démontrent que le piège ayant dix ouvertures de 4 mm de diamètre et l'attractif 40CT313 étaient optimaux pour capturer les CRC tout en réduisant les captures d'insectes non-cibles.

Pour répondre au deuxième objectif, en 2020 et 2021 le piège et l'attractif optimaux ont été évalués dans des cultures biologiques de cucurbitacées en protégeant une partie de chaque champ testé avec les pièges. Le nombre de CRC sur les plants des zones protégées et non-protégées des champs ont été comparés et les captures de CRC par pièges ont été dénombrées. Dans les conditions de nos essais, les résultats démontrent que les pièges n'ont pas réussi à réduire les populations de CRCs sous le seuil de dommage économique.

Cette étude montre que le piégeage massif de la CRC n'est pas encore suffisamment développé pour efficacement contrôler la CRC en culture biologique de cucurbitacées. Les résultats démontrent un certain potentiel du piège qui devrait être exploré dans d'autres études de terrain.

Mots clés: Lutte intégrée des ravageurs, *Acalymma vittatum*, écomones volatiles, attractifs, culture organique.

ABSTRACT

One of the most significant pests in cucurbit production in North America is the striped cucumber beetle (SCB) *Acalymma vittatum* F. Striped cucumber beetles can cause substantial losses in crop production by transmitting bacterial wilt *Erwinia tracheiphila*, and by causing aesthetic damage to fruit. While effective control methods exist for conventional farming, there are few alternatives available to organic growers. The objectives of this project are: i) to optimize a mass trapping method against SCBs adapted to organic production of cucurbits in Quebec, and ii) to evaluate the optimized mass trapping technique.

For the first objective, in 2019, five different traps and four types of attractants were tested in organic cucurbit crops. Throughout the growing season, SCBs captured were counted weekly, and non-target insects caught were identified and counted. The results show that the trap with ten openings of 4mm in diameter and the attractant 4OCT313 were optimal for capturing SCBs while reducing captures of non-target insects.

For the second objective, in 2020 and 2021, the optimal trap and attractant were evaluated in organic cucurbit crops by protecting a portion of each tested field with the traps. The number of SCBs on plants in protected and unprotected zones of the fields were compared, and captured SCBs in each trap were counted. The results indicate that the traps were ineffective at reducing SCB populations in comparison to non-protected areas of the fields and did not reduce the SCB population below the threshold of economic damage.

This study demonstrates that mass trapping of SCBs is not yet sufficiently developed to effectively control SCB in organic cucurbit farming. The results show some potential that should be explored in further field studies.

Keywords: integrated pest management (IPM), *Acalymma vittatum*, plant volatiles, attractants, organic crop production.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

La popularité des cucurbitacées a largement augmenté au cours de la dernière décennie au Canada. Cette culture légumière est maintenant la sixième plus importante au Canada, correspondant à 10,5% de la production totale de légumes commercialisés (Statistique Canada, 2019; Keable, 2018). Pour répondre à cette demande grandissante, les producteurs cultivent de plus grands volumes de ces cultures maraîchères. Au Québec, la culture de cucurbitacées correspond à près du quart de la production canadienne, soit plus de 49 000 tonnes métriques par an (Statistique Canada, 2019). Afin de maximiser le rendement des champs, les producteurs doivent limiter les dommages causés par diverses menaces aux plants de cucurbitacées. L'une des plus importantes menaces est un insecte indigène aux Amériques : la chrysomèle rayée du concombre (CRC), *Acalymma vittatum* F. (Coleoptera: Chrysomelidae). La distribution de la CRC est largement répandue sur le Nord du continent américain, incluant le Sud du Québec (**figure 1.1**; Sparks *et al.*, 2020).



Figure 1.1 Distribution de la CRC en Amérique du Nord (Sparks *et al.*, 2020).

La CRC engendre plusieurs sérieux problèmes aux plants. D'abord, la larve de la CRC se nourrit du système racinaire des cucurbitacées (Isley, 1927). Ensuite, l'adulte se nourrit des feuilles, des fleurs et de l'épiderme des fruits. Non seulement la CRC cause des dommages directs aux plants, mais elle peut aussi transmettre le virus de la mosaïque de la courge, ainsi que la bactérie *Erwinia tracheiphila* qui entraîne la plus grave

conséquence sur les plants : le flétrissement bactérien (**figure 1.2**; Monroe et Smith, 1980; Pitblado et Lucy, 1994).



Figure 1.2 Flétrissement bactérien sur un plant de cucurbitacée (Couture, 2017).

Les pertes qu'engendre la CRC dans les champs de cucurbitacées sont importantes : les dommages directs aux plants causés par la CRC affectent le nombre et la qualité des fruits et peuvent représenter jusqu'à 15% de perte de la production d'un champ (Pitblado et Lucy, 1994) et le flétrissement bactérien transmis par la CRC réduit la productivité des plants et peut entraîner jusqu'à 80% de perte (Rojas *et al.*, 2011). Afin de réduire ces pertes, les producteurs conventionnels utilisent des insecticides de synthèses coûteux potentiellement nocifs pour l'environnement et des espèces non-cibles. Par exemple, le CLUTCH 50 WDG™, un néonicotinoïde, et le Matador® 120EC, un pyréthroïde synthétique, sont des insecticides prescrits pour la suppression de la CRC en culture conventionnels (SAGÉ pesticides, 2024). Ils sont toxiques pour les organismes aquatiques, certains insectes bénéfiques, les abeilles, les oiseaux et les petits mammifères sauvages (SAGÉ pesticides, 2024). De plus, les ravageurs cibles développent parfois une résistance à ces produits (Cavanagh *et al.*, 2009; Couture, 2020; Lechenet *et al.*, 2017). Bien qu'aucun cas de résistance de la CRC aux pesticides ne soit rapporté dans la littérature, des chrysomélidés reliées à la CRC, comme le doryphore de la pomme de terre *Leptinotarsa decimlineata* (Say), ont développé une résistance à plusieurs pesticides (Alyokhin et al., 2008; Gassmann *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2019; Sparks *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2018). Comme alternative aux pesticides, les filets anti-insectes, les cultures pièges et les tunnels en plastique sont notamment utilisés pour contrôler la CRC au Québec (Brandt, 2012; Couture, 2017; Duval, 2013; Ingwell *et al.*, 2017).

Une nouvelle technique de lutte intégrée récemment créée au Missouri par Jaime Piñero en culture de cucurbitacée conventionnelle pourrait être prometteuse pour le Québec. Il s'agit du piégeage massif de la CRC en utilisant des pièges jaunes contenant des attractifs à base d'écomones volatiles de fleurs de cucurbitacée. Une écomone est une substance organique sécrétée par un organisme dans l'eau ou dans l'air qui exerce une action définie sur les organismes se trouvant à proximité. L'étude américaine a démontré que, par le biais de ce piégeage massif, les populations de CRC sont réduites et maintenues sous le seuil d'intervention économique d'un individu par plant, tout en capturant une quantité négligeable d'insectes non-cibles (Piñero et Lee, 2016). Des pré-tests basés sur le protocole de Piñero ont été effectués avant l'étude du présent mémoire en culture biologique au Québec en 2018. Les résultats de ces expériences préliminaires montrent une capture de CRC s'élevant à plus de 10,000 individus dans l'ensemble des pièges durant la saison de croissance. Toutefois, plus de 6,000 insectes non-cibles, pollinisateurs et ennemis naturels, ont aussi été capturés, contrairement aux résultats de Piñero. Bien que le piégeage massif de la CRC soit prometteur, l'usage d'écomones volatiles peut entraîner des captures d'insectes non-cibles, tels que les abeilles domestiques et d'autres insectes pollinisateurs ou encore d'ennemis naturels. Considérant que les cucurbitacées requièrent la pollinisation par les insectes pour la mise à fruit et l'intervention d'ennemis naturels pour contrôler divers ravageurs, la stratégie de piégeage massif de Piñero doit être adaptée à un contexte géographique, écologique, agronomique et un mode de culture différent (Bomfim *et al.*, 2016; Delaplane et Mayer, 2000; Hodek et Honěk, 2013)

1.2 Concepts biologiques relatifs à l'étude

1.2.1 Lutte contre les ravageurs

Un insecte est qualifié de ravageur lorsqu'il nuit aux cultures agricoles, aux jardins, aux arbres, à la végétation et aux denrées entreposées. Un ravageur peut nuire de façon directe, en s'alimentant des plantes et des denrées, ou de façon indirecte, en agissant comme vecteur d'agent pathogène dans les cultures agricoles ou dans les forêts (Dent et Binks, 2020). La CRC est un insecte ravageur car elle nuit de manière directe et indirecte aux cultures de cucurbitacées (Capinera, 2020). Afin de contrôler les populations de ravageurs comme la CRC dans les cultures, plusieurs méthodes peuvent être employées dont la lutte chimique, la lutte physique, la lutte biologique, la lutte culturale et la lutte intégrée.

Lutte chimique

En agriculture, la lutte chimique se caractérise par l'usage de produits de synthèse, tels que les insecticides, pour contrôler les ravageurs ciblés (Oxford reference, 2023). La lutte chimique comprend certaines

limitations. Bien que les insecticides visent à contrôler les ravageurs, leur spectre d'action n'est pas toujours ciblé. L'application de ces produits ne discrimine pas toujours les insectes cibles et non-cibles, ce qui peut parfois causer le déclin de certaines espèces pollinisatrices et d'ennemis naturels, mais ces effets indésirables sont mitigés si les pulvérisations se font avant la floraison lorsque les insectes pollinisateurs sont moins présents (Gray *et al.*, 2008). De plus, l'effet indirect des pesticides peut nuire à l'environnement et à la santé humaine (Atreya *et al.*, 2011). Il existe une dizaine de pesticides conventionnels utilisés contre la CRC et homologués au Canada, mais tous ces produits posent un risque modéré ou élevé pour les abeilles vu qu'ils contiennent des matières actives appartenant à des familles chimiques toxiques pour les abeilles telles que les néonicotinoïdes et les pyréthroïdes (Couture, 2020; SAgE pesticides, 2020; Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire du Gouvernement du Canada, 2019). Les seuls insecticides homologués au Canada pour la production biologique de cucurbitacées sont le Safer's® Insecticide Concentré Trounce, à base de sels de potassium gras et de pyréthrinés, et le Surround® WP, à base d'argile de kaolin (Couture, 2020; Santé Canada, 2020). Les pyréthrinés contenus dans le Trounce sont hautement ou extrêmement toxiques pour les abeilles et posent des risques de santé à long terme pour l'homme. Toutefois, leur concentration est très faible ce qui rend le Trounce plus sécuritaire mais moins efficace pour le contrôle des ravageurs (Couture, 2020; SAgE pesticides, 2020). L'argile de kaolin du Surround® WP n'est pas toxique pour les humains et les abeilles, mais elle peut perturber le mouvement et l'oviposition d'insectes non-cibles (Couture, 2020; Porcel *et al.*, 2011). Additionnellement, certains ravageurs peuvent développer une résistance aux pesticides rendant cette solution moins durable qu'espérée (Gray *et al.*, 2008). Jusqu'à présent, aucune étude n'a démontré que les CRCs ont développé une résistance aux pesticides, mais certaines chrysomèles parentés à la CRC (**figure 1.3**), telles que le doryphore de la pomme de terre et la chrysomèle des racines du maïs, ont développé une résistance à plusieurs classes d'insecticide, telles que les pyréthrinés et néonicotinoïdes (Alyokhin *et al.*, 2008; Gassmann *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2019; Sparks *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2018). Tout comme ses parents, la CRC possède les mêmes résistomes pouvant détoxifier des xénobiotiques comme les pyréthrinés et les néonicotinoïdes (Sparks *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016). Intégrer des méthodes de lutte alternatives dans les cultures de cucurbitacées pourrait limiter le développement de la résistance de la CRC et atténuer l'impact envers les insectes non-cibles.

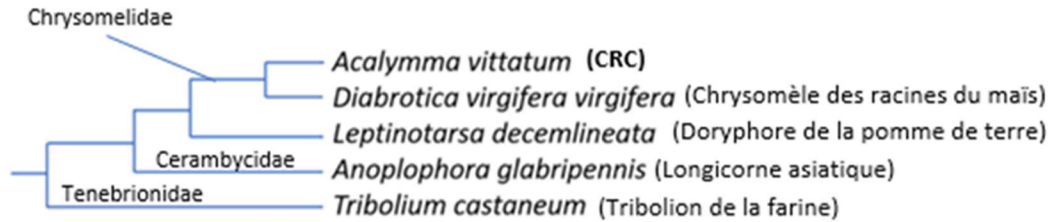


Figure 1.3 Cladogramme des espèces parentés à la CRC (Chrysomelidae: Galerucinae: Luperini: Diabroticina) possédant les résistomes aux pyréthrinés et néonicotinoïdes (*D. virgifera virgifera* et *L. decemlineata*) et deux espèces de références (*A. glabripennis* et *T. castaneum*; Sparks *et al.*, 2020).

Lutte physique

La lutte physique consiste à modifier l'environnement physique afin que les ravageurs ne représentent plus une menace pour les cultures (Vincent *et al.*, 2003). Deux types de méthodes fondamentales en lutte physique se distinguent : les méthodes actives, où l'utilisation d'énergie est nécessaire pour modifier l'environnement physique au moment de l'intervention, et les méthodes passives, caractérisées par une modification semi-permanente du milieu (Boisclair et Estevez, 2006).

Les méthodes de lutte physique passives contre la CRC sont notamment les paillis de plastiques, les filets anti-insectes, la culture en tunnels et le piégeage massif (Haber *et al.*, 2021; Ingwell et Kaplan, 2019). Une méthode de lutte physique active parfois utilisée contre la CRC est la succion à l'aide d'un aspirateur, mais cette approche est contraignante en raison du temps et ressources humaines nécessaires (Snyder, 2019). La méthode de lutte physique notamment utilisée au Québec pour contrôler la CRC est l'usage de filets anti-insectes (Couture, 2017). Bien qu'efficace, les filets anti-insectes posent certains désavantages (Ingwell et Kaplan, 2019). D'abord, les filets doivent être retirés durant la pollinisation et doivent être remplacés si la pression de CRC persiste après cette période. De plus, l'installation des filets et la réparation de filets troués par l'usure est coûteuse en temps et ressources humaines. Enfin, installés des filets sur des productions de cucurbitacées à grande échelle peut être irréaliste due aux contraintes énumérées précédemment.

Lutte culturale

La lutte culturale consiste à rendre l'environnement moins favorable à la survie, dispersion, reproduction et croissance des ravageurs (Hill, 1989). C'est une méthode de contrôle préventive plutôt que curative comme l'est la lutte chimique. De plus, la lutte culturale dépend d'une planification à long terme pour

maximiser son efficacité (Hill, 1989). Le **tableau 1.1** présente plusieurs méthodes culturelles utilisées pour le contrôle de la CRC.

Tableau 1.1 Méthodes culturales utilisées contre la CRC.

Méthodes culturales	Détails	Efficacité	Références
Rotation	Efficace pour la CRC vu qu'elle possède un spectre restreint d'hôtes principaux et hiverne à proximité des cultures. La rotation doit être intégrée à d'autres méthodes de lutte car elle ne réduira pas à elle seule les populations de CRC dû à leur grande mobilité.	Limitée	(Snyder, 2019)
Travail du sol	Le sarclage décourage les premières pontes de CRCs au sol dû à la perturbation du sol, donc son efficacité est limitée.	Limitée	(Pessarakli, 2016)
Date des semis	Retarder la transplantation des semis de cucurbitacée afin que les CRCs se dispersent pour pondre ailleurs. Aide seulement au début de la saison de croissance lorsque les plantules sont plus vulnérables.	Limitée	(Pessarakli, 2016 ;Gardner <i>et al.</i> , 2015)
Cultures pièges	Planter des cultures plus attractives pour la CRC, telle que la courge Blue Hubbard (<i>Cucurbita maxima</i>), autour de la culture d'intérêt pour dévier les ravageurs vers les cultures pièges. L'efficacité des cultures pièges est variable selon la variété de la culture d'intérêt.	Variable	(Adler et Hazzard, 2009 ;Gardner <i>et al.</i> , 2015)
Cultures intercalaires	Mélanger la culture de cucurbitacée avec une ou plusieurs autres cultures, comme le maïs, <i>Zea mays</i> , et le brocoli, <i>Brassica olercea</i> , afin de réduire la pression de la CRC sur les plants de cucurbitacées. Cette méthode aide à la réduction des CRCs mais ne réduis pas sous le seuil économique des dommages, donc elle doit être utilisée en parallèle avec d'autres méthodes.	Limitée	(Haber <i>et al.</i> , 2021 ;Hinds et Hooks, 2013)

Lutte biologique

La lutte biologique se caractérise par l'usage d'ennemis naturels pour contrôler les populations d'organismes nuisibles et les maintenir sous le seuil économique des dommages (De Clercq *et al.*, 2011). Différents agents de lutte biologique peuvent être employés, dont des virus, des bactéries, des champignons, des nématodes entomopathogènes, des insectes prédateurs et des parasitoïdes (De Clercq *et al.*, 2011). Quatre types de lutte biologique sont utilisés en agriculture : la lutte classique, la lutte conservative, la lutte inondative et la lutte inoculative (**tableau 1.2**; Eilenberg *et al.*, 2001).

Tableau 1.2 Définitions des différents types de lutte biologique.

Type de lutte biologique	Définition	Références
Lutte classique	Introduire intentionnellement un agent de lutte biologique exotique afin qu'il s'établisse en permanence et contrôle l'organisme nuisible.	(Kenis <i>et al.</i> , 2019)
Lutte conservative	Modifier l'environnement et/ou les pratiques en place afin de protéger les agents de lutte biologique et augmenter leur efficacité et leur survie à long terme.	(Eilenberg <i>et al.</i> , 2001)
Lutte inondative	Relâcher une grande quantité d'un agent de lutte biologique avec l'attente que ce dernier contrôle l'organisme nuisible à court terme sans la nécessité de se reproduire.	(Eilenberg <i>et al.</i> , 2001; Hajek, 2004)
Lutte inoculative	Relâcher un agent de lutte biologique avec l'attente qu'il se reproduise et contrôle l'organisme nuisible durant une période prolongée, mais pas en permanence.	(Eilenberg <i>et al.</i> , 2001)

Bien que la CRC possède plusieurs ennemis naturels, seuls les nématodes entomopathogènes (*Steinernema* spp. et *Heterorhabditis* spp.) peuvent être utilisés commercialement comme méthode de lutte inondative pour le contrôle de la CRC mais il n'y a toutefois pas de preuve concrète que cette méthode à elle seule soit efficace (Couture, 2017 ; Snyder, 2015). Il existe toutefois plusieurs autres organismes pouvant attaquer la CRC, dont les mouches tachinaires *Celatoria diabroticae* (Shimer) et *Celatoria setosa* (Coquillet), ainsi que *Centistes diabroticae* (Gahan), un parasitoïde de la famille des Braconidaes (**figure 1.4** ; Coco *et al.*, 2020; Couture, 2017).

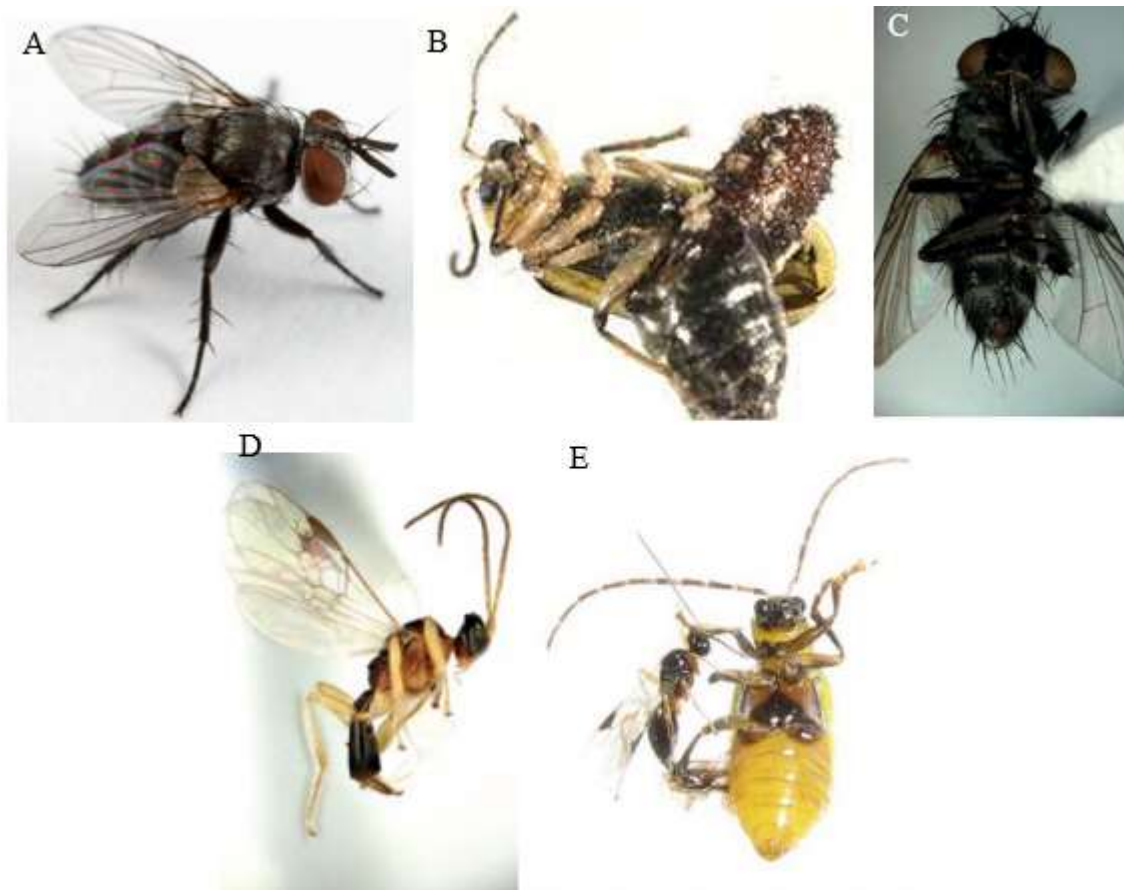


Figure 1.4 (A) *Celatoria diabroticae* adulte (Gross, 2017); (B) Pupa de *Celatoria setosa* sortant d'un adulte CRC (Kahl, 2018); (C) *Celatoria setosa* adulte (Haber *et al.*, 2021); (D) *Centistes diabroticae* adulte (Haber *et al.*, 2021); (E) *C. diabroticae* adulte avec une chrysomèle maculée du concombre, *Diabrotica undecimpunctata*, adulte (Haber *et al.*, 2021).

Lutte intégrée

La lutte intégrée consiste en la coordination d'une ou plusieurs méthodes de contrôle d'organismes nuisibles afin de créer une stratégie de gestion de ces derniers, tout en considérant l'impact sur les entreprises, la société et l'environnement (Kogan, 1998). Ce type de lutte est plus complexe que ceux présentés antérieurement et comporte six éléments fondamentaux : (1) les personnes qui conçoivent la stratégie ; (2) les connaissances requises pour créer une telle stratégie et prendre les décisions adéquates pour gérer le ravageur ; (3) un programme de dépistage et de l'état de différents éléments de l'environnement, par exemple le dépistage du ravageur et le nombre d'ennemis naturels présents ; (4) l'établissement de seuils auxquels une ou plusieurs méthodes de luttés adéquates sont déployées ; (5) les différentes techniques de lutte utilisées pour contrôler les ravageurs; et (6) les agents et les matériaux

employés pour l'exécution des techniques de lutte (Flint et Van den Bosch, 2012). En effet, la lutte intégrée est une stratégie dynamique qui répond aux changements de l'écosystème dans lequel elle est utilisée.

1.2.2 Lutte écomonale

Une écomone est une substance organique sécrétée par un organisme dans l'eau ou dans l'air qui exerce une action définie sur les organismes se trouvant à proximité. Les écomones volatiles peuvent être produites par toutes les parties d'une plante. Dans certains cas, l'émission d'écomones se produit par les feuilles lorsqu'elles subissent un stress, tel que l'attaque de pathogènes ou de ravageurs, afin de dissuader l'herbivore ou attirer des ennemis naturels (Loreto *et al.*, 2014). Similairement, le système racinaire produit des exsudats racinaires en réponse à l'herbivorie, ou encore pour la communication entre les racines (Robert *et al.*, 2012). Dans d'autres cas, les plantes émettent un mélange d'écomones depuis leurs fleurs pour encourager la visite de pollinisateurs (Loreto *et al.*, 2014). Toutefois, les messagers chimiques ont parfois des effets antagonistes sur leur émetteur (Nunes *et al.*, 2016). En effet, une écomone perçue par un pollinisateur ou ennemi naturel peut aussi être perçue par un herbivore. C'est le cas des cucurbitacées, où l'indole, le 1,2,4-triméthoxybenzène et le (E)-cinnamaldéhyde contribuent à l'attraction des pollinisateurs et des CRCs (Andrews *et al.*, 2007).

Les écomones volatiles peuvent être utilisées pour augmenter l'attraction de cultures pièges, faire le suivi des populations de ravageurs dans une culture ou encore repousser les ravageurs en agissant comme répulsif (Dicke et Takken, 2006; Light *et al.*, 2001; Martel *et al.*, 2005). Des stratégies de lutte contre les ravageurs incorporant des écomones volatiles émises par des plantes s'avèrent intéressantes pour l'attraction et le piégeage de ces indésirables (Szendrei et Rodriguez-Saona, 2010). Certaines études ont d'ailleurs démontré l'efficacité de pièges contenant des attractifs d'écomones volatiles sur la CRC et des ravageurs reliés, tels que la chrysomèle maculée du concombre, *Diabrotica undecimpunctata howardi* (Barber) et la chrysomélide rayée du concombre, *Diabrotica balteata* (LeConte) et la chrysomèle des racines du maïs, *Diabrotica virgifera virgifera* (LeConte) (Jackson *et al.*, 2005; Tóth *et al.*, 2006). De plus, l'usage d'écomones s'incorpore bien dans le contexte de lutte aux ravageurs en culture biologique, vu que ces messagers chimiques fabriqués en laboratoire sont des synthèses d'écomones naturellement émises par les plantes.

La réponse des insectes aux écomones volatiles peut varier selon : (1) le sexe de l'insecte (**figure 1.5A**), (2) les guildes alimentaires (**figure 1.5B**), (3) la taxonomie de l'insecte (**figure 1.5C**), et (4) le comportement

alimentaire (**figure 1.5D**; Szendrei et Rodriguez-Saona, 2010). D'autres éléments peuvent aussi influencer l'attraction d'insectes tels que le mode de déploiement de l'écomone, la complexité du mélange de différentes écomones, les types de substances chimiques utilisées pour fabriquer l'écomone synthétique dans des leurres et la taxonomie de la plante qui sert de modèle aux écomones synthétiques (Szendrei et Rodriguez-Saona, 2010).

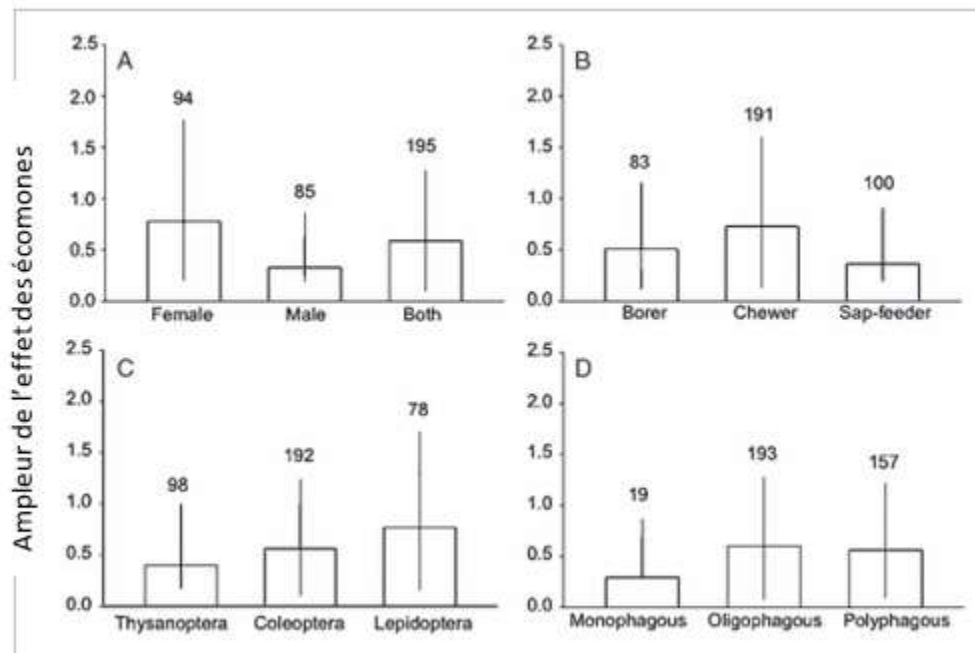


Figure 1.5 Ampleur de l'effet des écomones volatiles sur des insectes herbivores basé sur leur (A) sexe, (B) guildes alimentaires, (C) groupe taxonomique, et (D) comportement alimentaire. Les résultats des graphiques correspondent à une méta-analyse d'articles portant sur des expériences de terrain avec des herbivores et des écomones volatiles. Les chiffres au-dessus des barres d'erreur représentent le nombre d'observations utilisées pour calculer l'ampleur de l'effet des écomones dans chaque catégorie (Szendrei et Rodriguez-Saona, 2010).

1.2.3 Une technique de piégeage de masse prometteuse

Une méthode de piégeage massif de la CRC a récemment été développée dans le cadre du programme de lutte intégrée de l'Université de Lincoln, au Missouri. Cette méthode de lutte physique consiste en l'installation de pièges jaunes autour de parcelles de cucurbitacées dans le but de capturer la CRC. Les pièges contiennent des écomones florales volatiles ainsi que des comprimés contenant du carbaryl (Sevin®) afin de tuer les CRCs qui entrent dans les pièges. Par le biais de ce piégeage massif, les populations de CRCs ont été réduites et maintenues sous le seuil économique des dommages d'un individu par plant durant l'expérience (Piñero et Lee, 2016). Ce système simple se circonscrit bien dans la lutte intégrée, et pourrait offrir une alternative pour supporter les producteurs québécois qui affrontent la CRC.

Le présent projet se penchera sur la validation et l'optimisation de la technique de piégeage de masse (élaborée au Missouri) en cultures de cucurbitacées biologiques au Québec. Bien que l'auteur mentionne brièvement la capture accidentelle d'abeilles domestiques, on ignore si ces pièges capturent d'autres insectes non-cibles importants. Additionnellement, cette méthode de piégeage a seulement été testée dans des cultures de cucurbitacées conventionnelles au Missouri et utilisée par quelques producteurs du Missouri. Par conséquent, l'impact et l'efficacité de ce type de piégeage massif sont méconnus en cultures biologiques.

1.3 Système biologique

1.3.1 Les cucurbitacées

Les cucurbitacées forment une large famille de plantes herbacées rampantes ou grimpantes constituant 134 genres et près de 965 espèces (The Plant List, 2013). Ces plantes sont généralement monoïques et sont pollinisées par les insectes. Les fleurs peuvent être disposées en grappes ou seules et peuvent posséder trois, cinq ou six pétales selon l'espèce (Watson et Dallwitz, 1992). Le fruit est habituellement une baie modifiée appelée péponide, mais peut aussi être une capsule ou une samare selon l'espèce (Watson et Dallwitz, 1992). Pour les fins de cette étude, seules les cucurbitacées d'intérêts agricoles au Canada seront étudiées. Ces genres sont *Cucurbita* sp. (courges, courgettes et citrouilles), *Cucumis* sp. (concombres et melons brodés), *Citrullus* sp. (melon d'eau) et *Luffa* sp. (éponges végétales).

Importance économique

Au Canada, la production de cucurbitacées augmente à chaque année pour répondre à la demande croissante de la population. La disponibilité grandissante de variétés de courges, citrouilles et courgettes ainsi que la valeur nutritive de celles-ci expliquent la popularité de ces produits maraîchers (Keable, 2018). Il n'y a pas que la consommation de cucurbitacées fraîches qui a subi un accroissement ; les produits transformés, tels que les graines de citrouilles ou la chair de citrouille en conserve, ont aussi connu une hausse de leur consommation (Keable, 2018). Plus de 230 000 tonnes métriques ont été commercialisées en 2019 au Canada, le Québec étant le second plus important producteur de cucurbitacées du pays (**tableau 1.3**; Statistique Canada, 2019).

Tableau 1.3 Production de cucurbitacée et valeur à la ferme, au Québec et au Canada en 2019 (Statistique Canada, 2019).

	Québec	Canada
Production commercialisée (Tonnes métriques)	49 473	230 106
Croissance de production 2009 à 2019 (%)	132,3	135,5
Part des provinces (%)	22	100
Valeur à la ferme (M\$)	34,4	132,2

En 2019, la cucurbitacée la plus cultivée au Canada était la citrouille, où plus de 3000 hectares ont été consacrés à sa culture (Statistique Canada, 2019). Au Québec, ce sont les courges et courgettes qui sont les plus cultivées, couvrant une superficie de 863 hectares (Statistique Canada, 2019). En 2017, le nombre d'exploitations agricoles de cucurbitacées au Québec était de 621, où près du tiers de celles-ci étaient situées dans la région administrative de la Montérégie (**tableau 1.4**; Keable, 2018).

Tableau 1.4 Nombre d'exploitations agricoles cultivant des cucurbitacées par régions administratives au Québec en 2017 (Keable, 2018).

Région administrative	Nombre d'exploitations agricoles
Montérégie	179
Laurentides	61
Lanaudière	57
Chaudière-Appalaches	50
Capitale-Nationale	47
Estrie	38
Outaouais	37
Centre-du-Québec	33
Bas-Saint-Laurent	29
Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine	19
Saguenay-Lac-Saint-Jean	18
Mauricie	18
Laval	18
Abitibi-Témiscamingue	9
Montréal	5
Côte-Nord	3
Ensemble du Québec	621

Exigences climatiques

Les cucurbitacées sont des cultures de saison chaude et ne tolèrent pas le gel (Fitts, 2000). Les températures idéales pour la croissance des cucurbitacées sont de 23 à 29 °C. Elles tolèrent généralement bien la sécheresse, sauf durant des périodes prolongées. Lorsque la température tombe sous les 10 °C, les cucurbitacées cessent de croître. Retarder le semis au printemps ou encore installer un paillis de plastique permet donc d'éviter le risque que les températures soient trop froides pour la germination (Bodnar et Fitts, 2000). Pendant les périodes dont les températures sont sous les 22 °C, comme en début et en fin d'été, la majorité des cultivars de courges d'hiver et de citrouilles (*Cucurbita moschata*, *Cucurbita maxima* et certaines variétés de *Cucurbita pepo*) vont produire davantage de fleurs staminées (mâles). Les courges d'été (plusieurs variétés de *C. pepo*), quant à elles, forment davantage de fleurs pistillées (femelles) durant ces périodes fraîches (Bodnar et Fitts, 2000). Bien que ce sont les fleurs pistillées qui produisent les fruits, les fleurs staminées sont nécessaires pour la pollinisation.

Interactions mutualistes et antagonistes

Les cucurbitacées requièrent une pollinisation entomophile pour produire des péponides (Ternest *et al.*, 2020). Les pollinisateurs les plus efficaces pour les cucurbitacées sont l'abeille domestique, *Apis mellifera*, et l'abeille de la courge, *Eucera pruinosa*, mais d'autres insectes peuvent aussi polliniser les cucurbitacées tels que les halictes, les bourdons, certains lépidoptères, coléoptères, guêpes et mouches (Delaplane et Mayer, 2000; McGregor, 1976). Bien que les plants de cucurbitacée produisent 3,5 à 10 fois plus de fleurs staminées que de fleurs pistillées, ce sont les fleurs femelles qui attirent davantage les abeilles vu qu'elles offrent un plus grand volume de nectar (Delaplane et Mayer, 2000; Theis *et al.*, 2014). Outre l'attraction de pollinisateurs, les cucurbitacées attirent aussi certains ravageurs, telles que les chrysomèles rayées du concombre et les chrysomèles maculées du concombre. Ce sont les écomones volatiles émises par les plants qui causent des interactions à la fois mutualistes, lorsqu'il s'agit de pollinisateurs, et antagonistes lorsqu'il s'agit de ravageurs (Theis *et al.*, 2014). Parmi les écomones, on dénote les synomones, qui engendrent une relation mutualiste entre l'organisme récepteur (l'insecte) et l'émetteur (le plant), et les kairomones, qui cause une relation antagoniste ou commensale entre le récepteur et l'émetteur. Par conséquent, un composé sémiochimique volatil peut être à la fois une synomone et un kairomone.

L'effet attractif des cucurbitacées

Les fleurs de *Cucurbita* produisent trois écomones volatiles importantes pour l'attraction d'insectes : le 1,2,4-triméthoxybenzène (T), l'indole (I) et le (E)-cinnamaldéhyde (C), communément appelé TIC (Andersen et Metcalf, 1986; Andrews *et al.*, 2007 ; Metcalf et Metcalf, 1992). Theis et Adler (2007) ont d'ailleurs établi que le (E)-cinnamaldéhyde seul attirait le pollinisateur *E. pruinosa*, mais n'attirait pas la CRC. Quant à l'indole, seule la CRC y était attirée. Le 1,2,4-triméthoxybenzène attirait de manière significative la CRC et le pollinisateur, et la combinaison T+I+C était la plus efficace pour l'attraction de CRCs, sans toutefois attirer plus de pollinisateurs. Additionnellement, le 1,4-diméthoxybenzène et le sesquiterpénoïde β -caryophyllène sont d'autres composés chimiques importants pour l'attraction des CRCs (Theis et Adler, 2012). Les cucurbitacées produisent aussi des triterpénoïdes appelés cucurbitacines qui sont toxiques pour la plupart des insectes généralistes mais agissent comme stimulant alimentaire pour les chrysomèles de la tribu Luperini, telles que les CRCs (Brzozowski *et al.*, 2016; Metcalf *et al.*, 1980).

L'ordre de préférence alimentaire de la CRC n'est pas la même selon les références consultées. La courge Blue Hubbard (*C. maxima*) est l'une des variétés notamment utilisées comme culture piège et revient le plus souvent dans la littérature (Boucher et Durgy, 2004; Cavanagh *et al.*, 2009). D'autres références démontrent que les courges buttercup (*C. maxima*) et les zuchinnis (*C. pepo*) ont aussi un potentiel d'attraction semblable à celui de la courge Blue Hubbard et ont plus de potentiel commercial que cette dernière (Adler et Hazzard, 2009). Les concombres, les citrouilles et les autres courges d'été sont modérément attirants pour la CRC ; les melons (*Cucumis* sp. et *Citrullus* sp.) et les courges butternut (*C. moschata*), quant à eux, sont les moins attirants pour la CRC (Boucher, 2007; Couture, 2017).

Les ravageurs et pathogènes

Les principaux insectes ravageurs des cucurbitacées au Québec sont la punaise de la courge, *Anasa tristis* (De Geer)(Hemiptera : Coreidae), la chrysomèle des racines du maïs de l'Ouest, *Diabrotica virgifera virgifera* (LeConte)(Coleoptera : Chrysomelidae), le perceur de la courge, *Melittia cucurbitae* (Harris)(Lepidoptera : Sesiidae) et finalement, la CRC qui est le plus important ravageur en nombre et en dommages occasionnés (Fitts, 2000; IRIIS phytoprotection, 2020). La CRC, en plus de causer des lésions aux plants et aux fruits, est un vecteur du flétrissement bactérien, *Erwinia tracheiphila*, ainsi que pour le virus de la mosaïque de la courge (IRIIS phytoprotection, 2020; Isley, 1927). L'activité d'alimentation des larves de CRC sur les racines de cucurbitacées augmente aussi l'incidence et la sévérité des infections du

flétrissement fusarien causées par le champignon *Fusarium oxysporum* (Haber *et al.*, 2021; Richard et Boivin, 1994).

Les cucurbitacées sont aussi affligées par une variété de maladies fongiques, dont notamment le blanc causé par le champignon *Podosphaera xanthii* (Richard et Boivin, 1994; IRIIS phytoprotection, 2020). Additionnellement, les plants peuvent être touchés par différentes viroses, tels que le virus de la mosaïque du concombre, une maladie dévastatrice chez les cucurbitacées et transmise par plusieurs espèces de pucerons selon un mode non persistant (IRIIS phytoprotection, 2020 ; Richard et Boivin, 1994).

1.3.2 La chrysomèle rayée du concombre (CRC) : *Acalymma vittatum*

La CRC est un coléoptère faisant partie de la famille des Chrysomelidae. La classification taxonomique de cette dernière se compose de 12 ou 13 sous-familles reconnues, bien que les relations phylogénétiques soient encore à l'étude (Nie *et al.*, 2020; Staines *et al.*, 2011). La CRC appartient à la sous-famille des Galerucinae et à la tribu Luperini. Cette dernière est divisée en plusieurs sous-tribus, incluant Diabroticina à laquelle appartient le genre *Acalymma* (Clark *et al.*, 2001). La sous-tribu Diabroticina possède d'ailleurs d'autres chrysomèles pouvant endommager les cucurbitacées, telles que *Diabrotica barberi* (R. Smith et Lawrence), la chrysomèle des racines du maïs du Nord, *D. virgifera virgifera*, la chrysomèle des racines du maïs de l'Ouest, ainsi que *Diabrotica undecimpunctata howardi* (Barber), la chrysomèle maculée du concombre. Ces espèces n'ont toutefois pas un impact économique aussi important sur les productions de cucurbitacée que la CRC (Legault, 2007).

Cycle de vie au Canada

Après avoir hibernés dans le sol à proximité de cultures de cucurbitacées, les CRCs adultes émergent au printemps lorsque les températures dépassent les 10°C. Bien que les CRCs préfèrent se nourrir de cucurbitacées, elles peuvent s'alimenter d'hôtes alternatifs, dont des plantes de la famille des rosacées, des légumineuses et des astéracées, au début du printemps lorsque les cucurbitacées sont rares (Capinera, 2020; IRIIS phytoprotection, 2021). Dès la transplantation des plantules de cucurbitacée, les CRCs s'agrègent sur ceux-ci. L'agrégation sur les plants de cucurbitacées est intensifiée par une phéromone qu'émettent les mâles et qui attire leurs congénères mâles et femelles ; la vittatalactone (Morris *et al.*, 2005; Smyth et Hoffmann, 2003).

Une fois que les adultes se sont établis dans le champ de cucurbitacées, ils se nourrissent des plants et s'accouplent. La période de préoviposition des adultes dure environ une semaine, puis les femelles pondent leurs œufs sous la surface du sol près des plantes hôtes, 10 à 20 jours après l'accouplement (Capinera, 2020; Haber *et al.*, 2021). La quantité d'œufs que peut pondre une femelle varie selon les références. En effet, certaines sources affirment qu'une femelle pond entre 400 et 500 œufs en moyenne durant sa vie, la ponte maximale pouvant atteindre 1500 œufs (Capinera, 2020; Chittenden, 1923). D'autres références indiquent que les CRCs pondent entre 0 et 4 œufs par jour, produisant en moyenne 125 œufs durant leur vie (Ellers-Kirk et Fleischer, 2006; Legault, 2007). Le stade d'œuf dure de 5 à 10 jours, puis les larves vivent entre 15 et 45 jours dans le sol, se nourrissant exclusivement de racines de cucurbitacées (Capinera, 2020). La densité et le développement du système racinaire sont réduits par cette alimentation et peut mener à des pertes de rendement (Ellers-Kirk *et al.*, 2000). Les larves entrent ensuite en nymphose dans les cinq premiers centimètres de la surface du sol. Ce stade dure de 5 à 7 jours, puis les nouveaux adultes émergeront de leur pupes et du sol pour envahir les plants de cucurbitacées (**figure 1.6**; Capinera, 2020). Au retour des jours plus froids en automne, les adultes retournent aux sites d'hibernation afin d'y passer l'hiver (Kirby, 2016). Les CRCs requièrent entre 40 et 60 jours pour compléter une génération. Par ailleurs, le voltinisme de la CRC varie selon la longueur de la saison de croissance des cucurbitacées. Au Québec et en Ontario, la CRC ne possède qu'une génération par année, contrairement aux populations du sud des États-Unis, par exemple celle du Texas, qui peuvent avoir trois générations ou plus (Capinera, 2020; Legault, 2007).

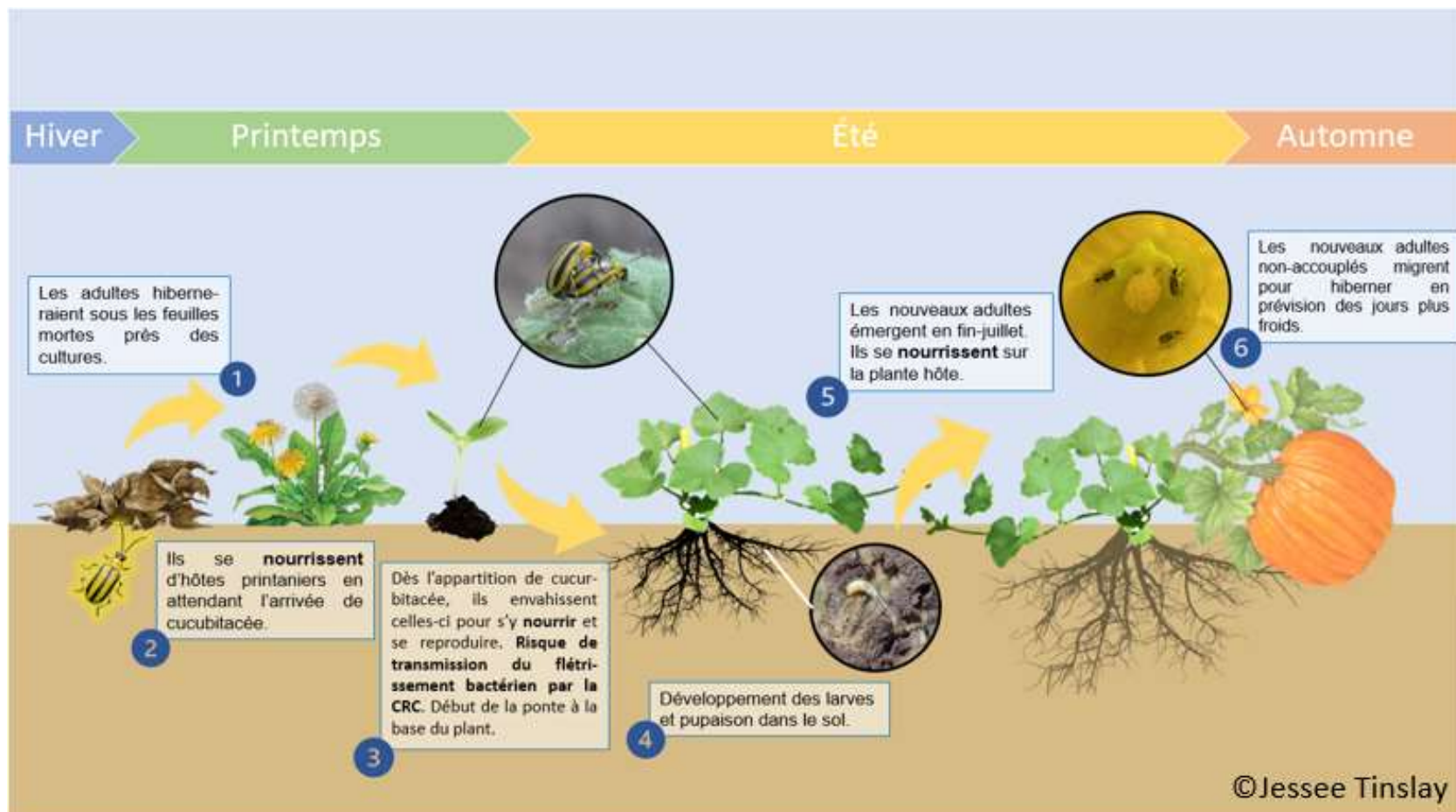


Figure 1.6 Schéma du cycle vital de la chrysomèle rayée du concombre (CRC) (Couture, 2017).

Dynamiques de population

La répartition des sexes correspond à 1:1, pour des températures allant de 18°C (température minimale pour le vol) à 36°C (température maximale de survie; Capinera, 2020; Eilers-Kirk et Fleischer, 2006). Les températures propices pour la survie des CRCs sont entre 24°C et 27°C. Par ailleurs, le stade adulte de la CRC dure généralement une soixantaine de jours, mais peut s'étendre jusqu'à 126 jours à une température de 27°C (Eilers-Kirk et Fleischer, 2006). Dû à leur longue vie et leur capacité reproductrice, les CRCs ont un taux d'augmentation intrinsèque d'approximativement 4% à 27°C (Eilers-Kirk et Fleischer, 2006).

Au Québec, deux pics de populations de CRCs sont remarquables durant la saison de croissance de cucurbitacées. Le premier pic arrive en début juin, lorsque les adultes qui ont hiberné envahissent les semis de cucurbitacées. C'est ensuite la progéniture de ces adultes qui forment le second pic qui a lieu vers la fin juillet ou début août (Couture, 2017).

Seuil d'intervention et dommages

Les seuils d'intervention pour contrer les ravages de la CRC varient entre 0,5 et 1 individu par plant selon l'espèce de cucurbitacée. Au Québec, ces seuils sont souvent déjà atteints à la fin du printemps, en juin. Le seuil est habituellement atteint avant le stade des 5 feuilles (5F). Au Québec, le concombre, *C. sativus*, les courges kabocha et buttercup, qui sont deux variétés de l'espèce *C. maxima*, et la courge spaghetti, *C. pepo*, ont un seuil d'intervention de 0,5 individu par plant pour 25 plants scrutés. Quant aux autres cucurbitacées, c'est lorsqu'on retrouve en moyenne un individu par plant pour 25 plants scrutés qu'il faut intervenir (Couture, 2017).

Bien que la CRC cause des dommages directs aux plants en se nourrissant des racines, feuilles, fleurs et fruits, pouvant ainsi réduire jusqu'à 15% les rendements, c'est le flétrissement bactérien transmis par la CRC qui cause les pertes plus importantes (Eilers-Kirk et Fleischer, 2006; Fleischer *et al.*, 1999). Comme son nom l'indique, le flétrissement bactérien est une maladie vasculaire causant d'abord le flétrissement des feuilles vertes, les rendant jaunes et/ou brunes. Elle se transmet habituellement avant le stade de 5F. Éventuellement, des brûlures brunes se forment et le flétrissement s'intensifie. C'est la prolifération de la bactérie *E. tracheiphila* dans les vaisseaux des plants qui engendre l'obstruction du transport de l'eau, causant ces effets indésirables (Richard et Boivin, 1994). Lorsque la maladie est avancée, les plants de cucurbitacées dépérissent (Rojas *et al.*, 2011). De plus, elle peut entraîner jusqu'à 80% de perte de

production (Rojas *et al.*, 2011). Un facteur important de l'épidémiologie du flétrissement bactérien est le comportement d'agrégation des CRCs, qui aggrave la propagation de cette maladie. En effet, *E. tracheiphila* dépend de la CRC pour hiberner et pour sa transmission aux plants (Fleischer *et al.*, 1999; Shapiro *et al.*, 2012). D'autres maladies moins importantes associées à la CRC sont le flétrissement fusarien dont les larves de CRCs créent les voies d'entrées aux champignons pathogènes qui causent cette maladie, et le virus de la mosaïque de la courge qui peut être transmis par les CRCs adultes mais qui est surtout transmis par la semence (Haber *et al.*, 2021; Latin et Reed, 1985; Richard et Boivin, 1994).

1.4 Objectifs et hypothèses

1.4.1 Objectifs principaux

Développer une stratégie efficace de piégeage massif contre la chrysomèle rayée du concombre en culture biologique de cucurbitacées.

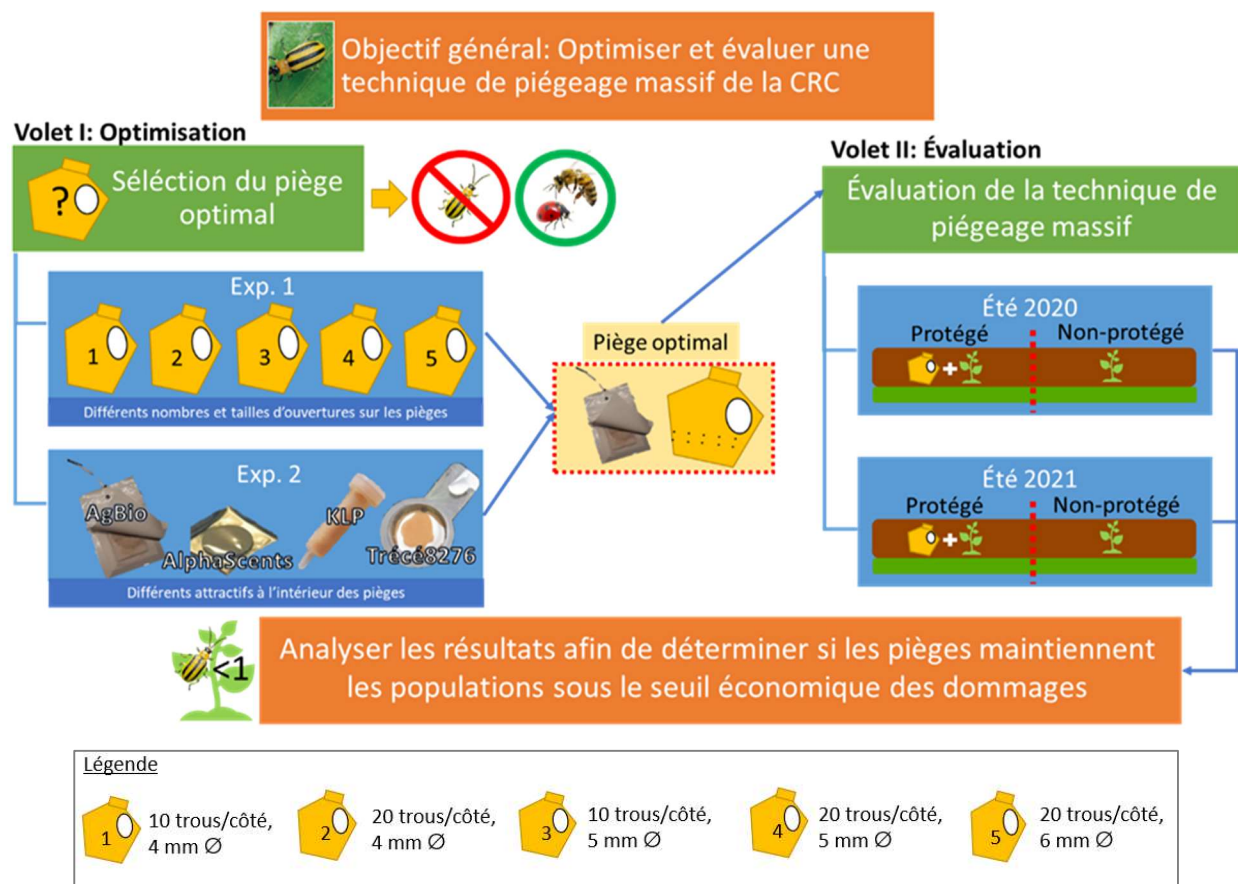


Figure 1.7 Organigramme du développement d'une stratégie de piégeage massif contre la CRC dans la production biologique de cucurbitacées au Québec.

1.4.2 Objectifs et hypothèses de recherches

Objectif spécifique 1 : Construire un type de piège optimal pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant celle des pollinisateurs et des ennemis naturels.

Hypothèse 1 : Il existe une taille et un nombre d'ouvertures dans les pièges qui permettent de maximiser les captures de CRC, tout en minimisant les captures d'insectes non-cibles.

Justification : L'expérience menée au Missouri par Piñero a démontré que, parmi trois types de pièges différents, les pièges possédant des trous perforés à l'aide d'une poinçonneuse de 6 mm de diamètre est la méthode la plus performante pour la capture de la CRC en comparaison à deux fentes par côté de 10 cm de longueur et 3 mm de largeur façonnées à l'aide d'un outil rotatif ainsi que deux fentes par côté de 10cm de longueur et 6 mm de largeur coupées avec un couteau (Piñero et Lee, 2016).

Objectif spécifique 2 : Sélectionner un attractif optimal pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant celle des pollinisateurs et des ennemis naturels.

Hypothèse 2 : Un type d'attractif sera plus efficace à attirer et capturer les CRCs que les autres types d'attractifs et le témoin.

Justification : Dans une autre expérience menée par Piñero en 2018, l'attractif fabriqué par la compagnie AgBio (AgBio 5-compound lure P313-B5, composés non divulgués, AgBio Inc., Westminster, CO) était plus attirant pour la CRC en comparaison aux attractifs Trécé TRE8274 (1,2,4-triméthoxybenzène [250 mg], indole [250 mg], (E)-cinnamaldéhyde [250 mg], et 4-méthoxycinnamaldéhyde [750 mg]), TRE8276 (1,2,4-triméthoxybenzène [500 mg], indole [500 mg], et (E)-cinnamaldéhyde [500 mg]), TRE8336 (1,2,4-triméthoxybenzène [500 mg], (E)-cinnamaldéhyde [500 mg], et 4-méthoxyphénéthanol [500 mg]) et le témoin (aucun attractif ; Piñero, 2018). Il est donc probable qu'un attractif soit plus efficace pour capturer les CRCs par rapport au témoin et aux autres types d'attractifs testés.

Objectif spécifique 3 : Évaluer le piégeage massif de la CRC en culture biologique de cucurbitacée de plein champ en utilisant le piège et l'attractif les plus performants du volet I.

Hypothèse 3 : La technique de piégeage de masse réduira et maintiendra les populations de CRC sous le seuil économique des dommages (1 individu par plant).

Justification : La technique de piégeage de masse testée par Piñero en 2016 a réussi à réduire et maintenir le nombre de CRC par plant de cucurbitacées sous le seuil économique des dommages. En effet, seulement 0,42 CRC/plant étaient dénombrées à la suite du déploiement du piégeage de masse (Piñero et Lee, 2016). Toutefois, Piñero et Lee ne précisent pas le nombre de CRC dans les parcelles expérimentales sans l'utilisation de la stratégie de piégeage massif, mais indiquent que les pièges causent une suppression importante de la CRC.

CHAPITRE 2

Optimization of a mass trapping method against the striped cucumber beetle *Acalymma vittatum* in organic cucurbit fields

Jessee Tinslay, Marc Fournier, Isabelle Couture, Pierre Lafontaine, Maxime Lefebvre, Éric Lucas

Ce chapitre présente l'article scientifique publié au journal *Insects* de MDPI le 17 mai 2022.

2.1 Résumé/Abstract

La chrysomèle rayée du concombre (CRC) *Acalymma vittatum* (F.) (Coleoptera : Chrysomelidae) est l'un des plus importants ravageurs dans les cultures de cucurbitacées en Amérique du Nord. Bien que certains pesticides chimiques contrôlent efficacement la CRC dans les champs de cucurbitacées conventionnels, des solutions alternatives sont nécessaires en raison de l'évolution constante des réglementations sur les pesticides. Pour les producteurs en régie biologiques, peu de méthodes de lutte sont disponibles. Une nouvelle méthode de piégeage de masse démontre le potentiel de contrôler les CRC en utilisant des pièges appâtés avec des écomones volatiles synthétisées dans les cultures de cucurbitacées biologiques. Les objectifs de cette étude sont (1) de déterminer si les pièges appâtés capturent plus de CRC que les pièges non appâtés, et (2) d'optimiser la méthode de piégeage en comparant différents types de pièges et différents attractifs disponibles commercialement pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant la capture d'espèces non-cibles. Les résultats de la première expérience montrent que les pièges appâtés capturent significativement plus de CRC que les pièges non appâtés. De plus, les pièges appâtés capturent significativement plus d'abeilles et de syrphes que les pièges non appâtés. Dans la deuxième expérience, ces captures indésirables sont considérablement réduites en utilisant des pièges avec dix ouvertures de 4 mm de diamètre de chaque côté. Enfin, la troisième expérience a démontré que l'attractif 40CT313 est le plus efficace pour capturer la CRC par rapport aux autres leurres testés. Globalement, la technique de piégeage de masse optimisée démontre un potentiel pour contrôler efficacement les populations de CRC dans les cultures biologiques de cucurbitacées.

Mots-clés : lutte intégrée des ravageurs ; écomones volatiles floraux ; sémiochimiques végétaux ; attractifs ; production biologique

The striped cucumber beetle (SCB) *Acalymma vittatum* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) is a prime problem in North American cucurbit crops. While certain chemical pesticides efficiently control SCB in conventional cucurbit fields, alternative solutions are required due to the ever-evolving regulations on pesticides. For organic producers, very few control methods exist. A novel mass trapping method demonstrates the potential of controlling SCBs using floral-based semiochemical baited traps in cucurbit crops. The goals of this study were to (1) determine whether baited traps capture more SCBs than unbaited ones, and (2) optimize the trapping method by comparing different trap types and different commercially available attractants to maximize SCB captures while minimizing non-target species captures. The results of a first experiment showed that baited traps captured significantly more SCBs than unbaited ones. Baited traps also captured significantly more bees and hoverflies than unbaited ones. In a second experiment these unwanted captures were drastically reduced by using traps with ten 4 mm in diameter holes per side. Finally, a third experiment demonstrated that the attractant 4OCT313 was the most efficient at capturing SCB compared to other tested lures. Overall, the optimized mass trapping technique demonstrated a potential to effectively control SCB populations in organic cucurbit crops.

Keywords: integrated pest management (IPM); flower volatiles; plant semiochemicals; attractants; organic crop production

2.2 Introduction

In North America, the striped cucumber beetle (SCB) *Acalymma vittatum* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) is a main pest in cucurbit fields since the beginning of the 20th century [1,2]. Striped cucumber beetles have one generation per year in Canada, but their voltinism can vary according to geographical regions, reaching up to three generations per year in southern parts of the United States [3]. They emerge from their hibernation when temperatures reach 10 °C. The exact hibernation sites are still unclear; however, SCB have been found to hibernate under leaf litter and dense weeds near cucurbit fields, underground below frost level, or along river bottoms and dense weeds near river bottoms [4,5,6,7].

In spring, SCBs feed on alternative hosts, such as rosaceas, asteraceas, and legumes [3,4]. They will invade cucurbits as soon as seedlings are transplanted into fields. In Quebec, Canada, two SCB population peaks are notable during the cucurbit growth season: one in spring, when cucurbit seedlings are being transplanted to fields and hibernating adults leave intermediate host plants to aggregate onto cucurbits, and one at the end of July, which corresponds to the new adult generation that will hibernate in fall. Intervention thresholds range between 0.5 SCB per plant for cucumber (*Cucumis sativus* (L.)), kabocha and buttercup squash, which are two varieties of the species *C. maxima* (Duchesne), and spaghetti squash, *Cucurbita pepo* (L.). As for the other cucurbits, the economic threshold corresponds to one SCB per plant [8].

Striped cucumber beetles directly damage cucurbit roots, plants, and fruits through feeding and may transmit several diseases [4,9]. Bacterial wilt, caused by the bacteria *Erwinia tracheiphila*, is one of the most serious diseases transmitted by SCBs and can lead to 80% losses in cucurbit crop productions [9,10]. For Canadian organic cucurbit producers, limiting damage caused by SCBs is a difficult task since few effective options exist to control SCBs in their crops. Only two organic insecticides are listed in Organic Materials Review Institute (OMRI) of Canada for use against SCBs; the Safer's® Insecticide Trounce Concentrate and the Surround® WP [11,12]. However, both insecticides present limitations. Safer's® Insecticide Trounce is a pyrethrin-based pesticide and is highly toxic to bees, which must be applied in the evening to mitigate effects on bees. Surround® WP is a kaolin clay that prevents oviposition of non-target insects and washes off during rain showers [11,13,14]. Insect-proof nets, crop rotation, trap crops, and plastic tunnels constitute integrated pest management alternatives to protect small cucurbit cultivars in Quebec (Canada), but have limitations such as the duration of use, the cost and effort required for installation [4,13,15,16,17,18].

A mass trapping method developed by Jaime Piñero and Rusty W. Lee in 2016 provides a potential alternative for organic cucurbit producers [19]. In Piñero and Lee's study, traps baited with plant-based semiochemical lures reduced populations within conventional cucurbit fields under the economic threshold [19]. The study also showed that the trapping method captured few non-target insects, such as pollinators, which are valued allies in entomophilous crops like cucurbits [20,21,22,23]. This trapping method was used in combination with conventional pesticide control.

Insects, including SCBs, forage using both olfactory and visual cues. Plant volatiles and color may encourage mutualistic interactions, for example, pollination, or to repel antagonistic interactions, such as herbivory [24,25,26]. Consequently, plant volatiles which attract pests possess interesting potential for trapping methods [19,27,28]. For cucurbits, three volatile semiochemicals are responsible for attraction of both pollinators and SCBs: 1,2,4-trimethoxybenzene, indole, and (E)-cinnamaldehyde, also called TIC [29,30,31]. For SCB control, these volatile semiochemicals are synthesized and converted into commercially available attractants and easy to use [32,33,34]. As for visual cues, it has been previously established that yellow was the most attractive color for SCB, and traps of this color maximized captures [35].

Trap types, such as shape and color of traps, and baits, such as semiochemical lures, food and pheromonal lures, can largely influence both pest captures and bycatch of non-target species [35,36,37]. It is therefore primordial to use traps that will target pests while minimizing bycatch of other species, as traps can detriment local non-target insect populations, such as beneficial predators and pollinators [38].

The first objective of our study was to assess the potential of the semiochemical-baited traps to control SCBs in Canadian organic agroecosystems. We predicted that baited traps would capture significantly more SCBs than unbaited traps in organic cucurbit crops. The second objective was to select the optimal trap within five trap types with different number and width of openings. Our predictions were (1) that smaller openings would prevent capturing larger beneficial insects, such as bees or ladybird beetles, while still enabling SCBs to be trapped; or (2) that fewer openings would reduce the amount of SCBs captured. The final objective was to compare the efficiency of the different semiochemical-based lures commercially available, our prediction being that one commercially available attractant would attract significantly more SCBs than the other attractants tested.

2.3 Materials and methods

2.3.1 Study sites and experimental plots

The first experiment, consisting of comparing baited versus unbaited traps, was conducted during summer 2018 (26 June 2018 to 28 August 2018) in *La Bourrasque* organic farm (site 1) in Saint-Nazaire-d'Acton (Quebec, Canada) (45°74' N, 72°65' W). Fields were plowed the previous fall. Two plots, a cucumber (*Cucumis sativus*) field of 75 m × 5 rows and a zucchini (*Cucurbita pepo*) field of 75 m × 5 rows were tested. The rows were prepared with raised beds 1.2 m wide × 0.15 m high and covered by plastic mulch in the cucumber field. Fields were irrigated when necessary, and fertilizers were applied based on crop recommendation. Neither fungicides nor insecticides were used.

Two other experiments, one consisting of comparing trap types and the other attractant types, were conducted during summer 2019 (11 June 2019 to 29 September 2019) in *La Bourrasque* farm (Site 1) and *Samson & fils* organic farm (site 2) in Farnham (Quebec, Canada) (45°25' N, 72°96' W). In both sites, *Cucurbita moschata* (Duchesne; butternut squash) and *C. pepo* (delicata, spaghetti and acorn squashes, pumpkins, and zucchinis) were mixed in the rows. In *La Bourrasque* farm *Cucurbita maxima* (buttercup squash) and *Luffa* sp. were also mixed in the rows. Fields were plowed the previous fall. The rows were prepared with raised beds 1.2 m wide × 0.15 m high. In *Samson & fils* farm, there were 10 rows measuring 492 m in length, the beds were covered with plastic mulch, and areas between rows were weeded either by hand or with a row cleaner. In *La Bourrasque* farm, there were 15 rows measuring 150 m in length, no plastic mulch was used, and the beds were occasionally weeded by hand. In both sites, the native vegetation growing near the traps was mowed to ensure visibility. In both sites, plots were irrigated when required, and fertilizers were applied based on crop recommendation. In *Samson & fils* farm, the copper fungicide Cueva® Commercial was applied twice, and the organic pesticide Trounce® was applied once on 11 July 2019, to reduce SCB populations in the crops. In *La Bourrasque* farm, neither insecticides nor fungicides were used.

2.3.2 Pest Control Potential of the Mass Trapping Method

In this experiment, we determined whether the mass trapping method was promising for organic cucurbit productions in Quebec through a split-plot experimental design. Traps were modified from Piñero & Lee's trap design [19]. Plastic milk jugs (3.8 L) were pierced using a 6 mm in diameter soldering iron. Holes made using this technique measured 5.94 ± 0.13 mm. Two series of ten holes were perforated horizontally on each side of the jugs. The traps were spray-painted yellow with a high gloss paint (Krylon® sun yellow) to

improve SCB attraction. Both zucchini and cucumber plots were split in two, paired treatments; a side protected by 6 baited traps, and a side protected by 6 unbaited traps. The lure used was Trécé TRE8276 (1,2,4-trimethoxybenzene [500 mg], indole [500 mg], and (E)-cinnamaldehyde [500 mg]; Trécé®, Adair, OK, USA). Each trap was filled with 1 L of unscented soapy water to drown the insects. A lure was inserted through the opening of the jug and suspended using a twist tie. The string was secured using the screw-top lid. The two treatments were distanced 15 m within a plot and traps within a treatment were installed 0.45 m above the ground and placed 5 m from one another. The traps were installed on 26 June 2018, along the edge of the ditch or forest bordering the plots. Every week, for 9 weeks, the SCBs captured in each trap were counted and the soapy water within the traps was changed. Starting on 10 July 2018, captured non-target insects, i.e., bees, hoverflies, and ladybirds, were identified and counted in situ. For each experiment, the numbers of insects captured in the treatments were compared separately for SCB, bees, hoverflies, and ladybirds. The data was non-parametric and one-way ANOVAs were used for statistical analysis.

All statistical analyses in this study were performed using R statistical software version 4.1.0 using [AICcmodavg] and [multcompView] libraries (R Core Team, 2021). Data did not require transformation

2.3.3 Selection of the Optimal Trap (Number and Diameter of Trap Entrances)

In this experiment, we compared five trap types to maximize SCB captures and to limit non-target insect captures. The traps were made following the same protocol as in the first experiment, except that the size and number of holes varied from one type to the other. The five treatments corresponding to different trap types were

1. T20-4mm: traps with two series of ten holes of 4 mm in \emptyset (diameter) per side;
2. T10-4mm: traps with two series of five holes of 4 mm in \emptyset per side;
3. T20-5mm: traps with two series of ten holes of 5 mm in \emptyset per side;
4. T10-5mm: traps with two series of five holes of 5 mm in \emptyset per side;
5. T20-6mm: traps with two series of ten holes of 6 mm in \emptyset per side.

The traps were installed on 18 June 2019, at both sites (site 1 and 2) and arranged in a randomized complete block design (RCBD) repeated four times. The traps were placed 5 m from one another along the edge of the ditch or forest bordering the plots and installed 0.45 m above the ground. Every week, the

insects captured in each trap were collected in small alcohol-filled vials and brought back to the laboratory to be identified and counted. The soapy water within the traps was also changed weekly.

The identified captured insects were categorized into three functional groups: pollinators, natural enemies, and pests. For each experiment, the numbers of insects captured in the treatments were compared separately for SCB, bees, hoverflies, and ladybirds. The data was non-parametric, and a one-way ANOVA was used for statistical analysis. Whenever appropriate, means were separated by a post hoc Tukey's significant differences at the $p = 0.05$ level.

2.3.4 Selection of the Optimal Lure

The attractiveness of four commercial floral-based semiochemical lures to SCB adults and non-target insects was compared in a RCBD repeated four times. The trap used for this experiment was the "T20-6mm" trap from the previous experiment. The five treatments corresponding to lure types were

1. Alpha Scents SCB lure (Alpha Scents Inc., Canby, OR, USA) composed of Indole, (E)-cinnamaldehyde and 1,2,4-trimethoxybenzene, i.e., TIC mixture [26];
2. 40CT313 5-compound lure (Distribution Solida Inc., Saint-Ferréol-les-Neiges, QC, Canada), the identities of the five compounds of the 40CT313 lure were not disclosed. This attractant is the equivalent of the AgBio 5-compound lure P313-B5 (AgBio Inc., Westminster, CO, USA), which Piñero had found to be most attractive to SCB in his research;
3. KLP lure composed of 4-methoxy-cinnamaldehyde and indole (Csalomon®, Budapest, Hungary);
4. Trécé TRE8276 (1,2,4-trimethoxybenzene [500 mg], indole [500 mg], and (E)-cinnamaldehyde [500 mg], i.e., TIC mixture (Trécé®, Adair, OK, USA);
5. No lure.

The experimental design, sampling, and statistical analysis were the same as in the previous experiment.

2.4 Results

2.4.1 Pest Control Potential of the Mass Trapping Method

Over the eight weeks of the experiment, a total 1919 SCBs were captured in both treatments. Baited traps captured 1.70 times more SCBs than unbaited traps. The baited traps captured significantly more SCBs

than unbaited traps in cucumber plots, but not in zucchini plots (ANOVA, cucumber: $F_{1,106} = 3.94$, $p < 0.05$; zucchini: $F_{1,106} = 2.89$, $p = 0.09$; **Figure 2.1**).

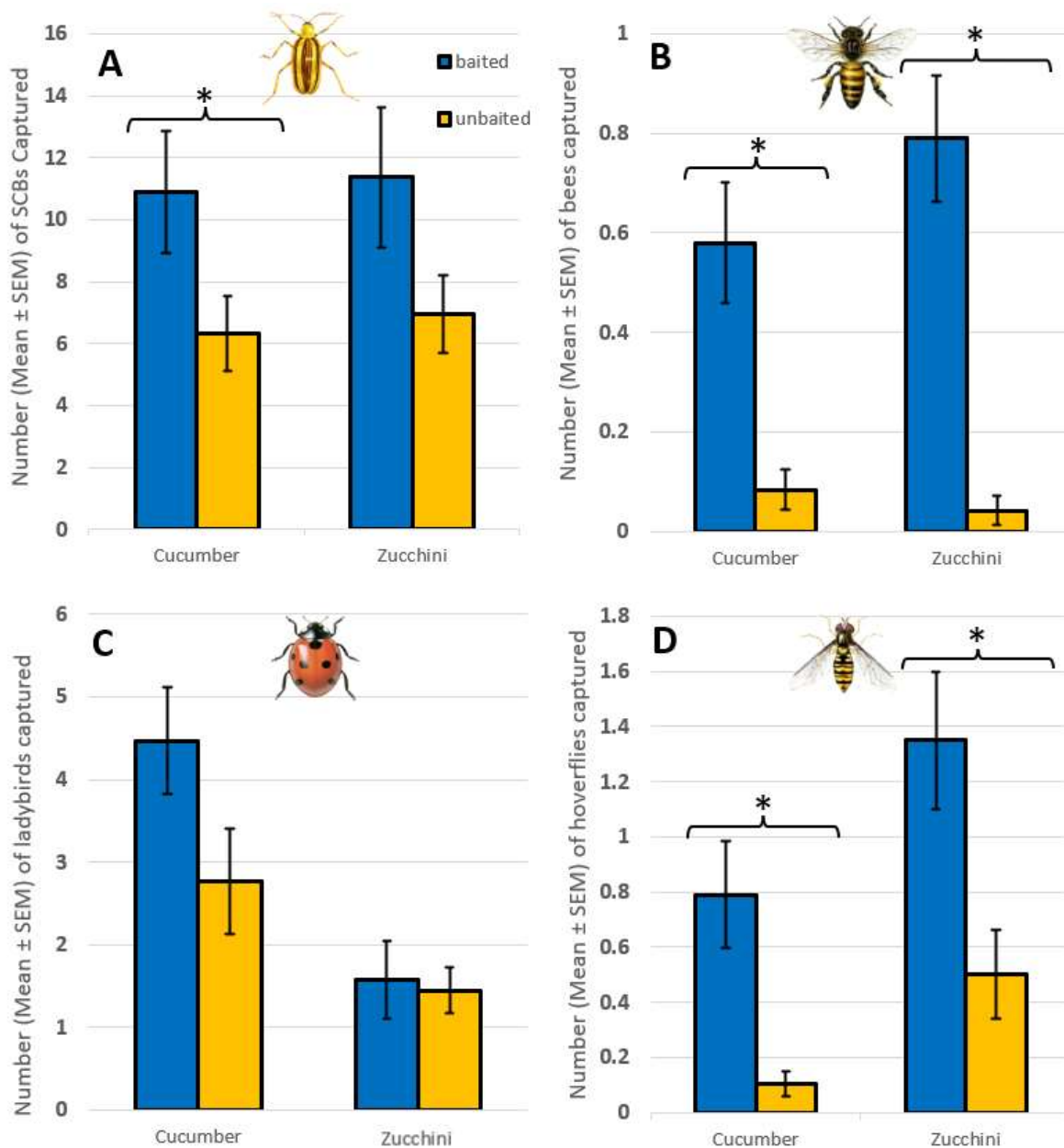


Figure 2.1 Number of SCBs, ladybirds, bees, and hoverflies captured in baited and unbaited traps in cucumber and zucchini plots (ANOVA). (A) SCB—cucumber: $F_{1,106} = 3.94$; $p < 0.05$; zucchini: $F_{1,106} = 2.89$; $p = 0.09$, (B) bees—cucumber: $F_{1,94} = 15.11$; $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 33.54$; $p < 0.001$, (C) ladybirds—cucumber: $F_{1,94} = 3.56$; $p = 0.06$; zucchini: $F_{1,94} = 0.05$; $p = 0.82$, (D) hoverflies—cucumber: $F_{1,94} = 11.80$; $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 8.36$; $p < 0.01$). Asterisks above bars indicate significant differences according to ANOVA tests at $p = 0.05$.

A total of 72 bees (Hymenoptera: Apoidea (Latreille)) were captured in both treatments. Baited traps captured 3.57 times more bees than unbaited traps, the difference between baited and unbaited traps being significant in both cucumber and zucchini plots (ANOVA, cucumber: $F_{1,94} = 15.11$, $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 33.54$, $p < 0.001$; **Figure 2.1**).

A total of 494 ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae; 417 *Harmonia axyridis* (Pallas), 46 *Coleomegilla maculata* (De Geer), 10 *Coccinella septempunctata* L., 12 *Propylea quatordecimpunctata* (L.), and 9 *Hippodamia* sp. (Chevrolat)) were captured. Baited traps captured 1.20 times more ladybirds than unbaited traps; however, this difference was not significant in either crop (ANOVA, cucumber: $F_{1,94} = 3.56$, $p = 0.06$; zucchini: $F_{1,94} = 0.05$, $p = 0.82$; **Figure 2.1**).

A total of 132 hoverflies (Diptera: Syrphidae) were captured in both treatments. Baited traps captured 2.16 times more hoverflies than unbaited traps, the difference between baited and unbaited traps being significant in both cucumber and zucchini plots (ANOVA, cucumber: $F_{1,94} = 11.80$, $p < 0.001$; zucchini: $F_{1,94} = 8.36$, $p < 0.01$; **Figure 2.1**).

2.4.2 Selection of the Optimal Trap (Number and Diameter of Trap Entrances)

A total of 4172 SCBs were captured in this experiment. There were no significant differences in SCB captures among the different treatments (traps with two series of ten holes of 4 mm in \emptyset per side, traps with two series of five holes of 4 mm in \emptyset per side, traps with two series of ten holes of 5 mm in \emptyset per side, traps with two series of five holes of 5 mm in \emptyset per side, and traps with two series of ten holes of 6 mm in \emptyset per side; ANOVA $F_{4,499} = 0.86$, $p = 0.49$; **Figure 2.2**). Spatial blocks were a significant factor (ANOVA, $F_{4,499} = 4.05$, $p < 0.05$).

A total of 146 bees (107 *Apis mellifera* L., 6 *Bombus* sp. (Latreille) and 33 *Peponapis pruinosa* (Say)), were captured. Traps with 6 mm entrances captured significantly more bees than traps with 4 mm and 5 mm entrances. Traps with 5 mm entrances captured significantly more bees than traps with 4 mm entrances (ANOVA $F_{4,503} = 13.78$, $p < 0.001$; Figure 2). Additionally, the number of entrances per trap did not significantly impact bee captures among the same size of entrances (T5mm-20–T5mm-10 $p_{adj} = 0.96$; T4mm-20–T4mm-10 $p_{adj} = 0.64$).

A total of 33 ladybirds (18 *H. axyridis* and 15 *C. septempunctata*) were captured. Traps with 6 mm entrances captured significantly more ladybirds compared to traps with 4 mm entrances (T6mm-20–T4mm-10 $p_{adj} < 0.01$; T6mm-20–T4mm-20 $p_{adj} < 0.01$), but not with traps with 5 mm entrances (T6mm-20–T5mm-10 $p_{adj} = 0.14$; T6mm-20–T5mm-20 $p_{adj} = 0.33$; **Figure 2.2**). There was no significant difference in ladybird captures between traps with 4 mm entrances and those with 5 mm entrances (ANOVA $F_{4,499} = 4.31$, $p < 0.01$; **Figure 2.2**). A post hoc Tukey test showed that the number of entrances per trap did not significantly impact ladybird captures (T5mm-20–T5mm-10 $p_{adj} = 0.99$; T4mm-20–T4mm-10 $p_{adj} = 1.00$).

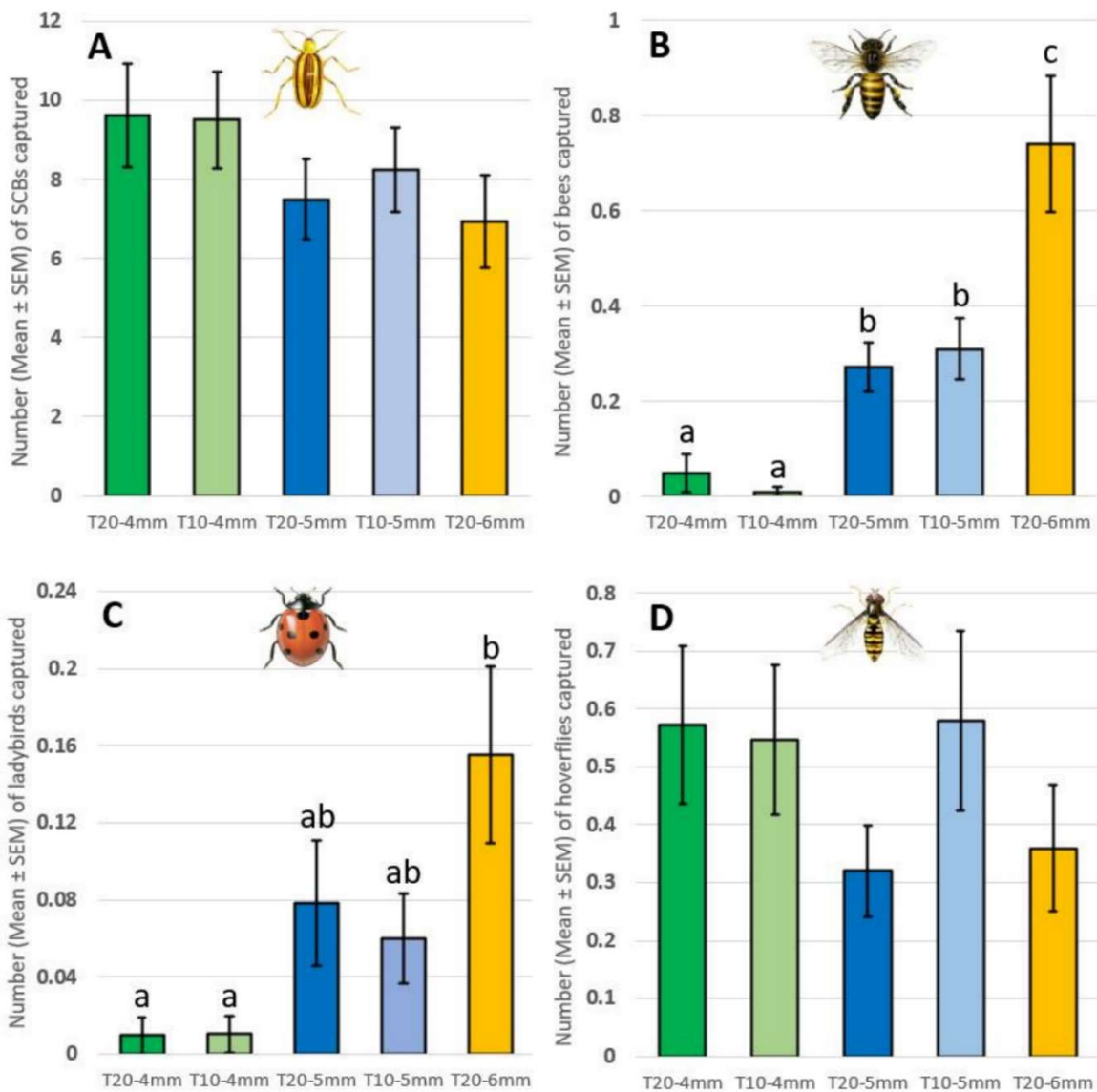


Figure 2.2 Number of SCBs, ladybirds, bees, and hoverflies captured in different trap types (ANOVA). (A) SCB— $F_{5,499} = 0.85$, $p = 0.49$; (B) bees— $F_{4,503} = 13.78$, $p < 0.001$; (C) ladybirds— $F_{4,500} = 4.31$, $p < 0.01$; (D) hoverflies— $F_{4,501} = 0.96$, $p = 0.43$). Different letters above bars indicate significant differences according to the Tukey HSD test ($p < 0.05$).

A total of 240 hoverflies (210 *Toxomerus* sp. (Macquart), 7 *Allograpta* sp. (Osten Sacken), 16 *Syrrita* sp. (Le Peletier & Serville), 4 *Rhingia* sp. (Scopoli), 1 *Eristalis* sp. (Latreille), and 2 *Eupeodes americanus* (Wiedemann) were captured. There were no significant differences in hoverfly captures among the different treatments (ANOVA $F_{4,501} = 0.96$, $p = 0.43$; **Figure 2.2**).

2.4.3 Selection of the Optimal Lure

A total of 2734 SCBs were captured in this experiment. Traps baited with 40CT313 attractants captured significantly more SCBs than all other treatments (AlphaScents, KLP, TRE8276 and unbaited) (ANOVA $F_{4,505} = 22.02$, $p < 0.001$; **Figure 2.3**).

A total of 992 bees (553 *A. mellifera*, 53 *Bombus* sp. and 386 *P. pruinosa*) were captured. Traps baited with 40CT313 attractants captured significantly more bees than other treatments (ANOVA $F_{4,505} = 15.55$, $p < 0.001$; **Figure 2.3**). All the traps used in this this experiment had two series of ten holes of 6 mm in diameter per side, i.e., the largest opening tested of the first experiment.

A total of 173 ladybirds (18 *P. quatuordecimpunctata*, 28 *C. maculata*, 99 *H. axyridis*, 26 *C. septempunctata*, and 2 *Hippodamia* sp.) were captured. There were no significant differences in captures between treatments (ANOVA $F_{4,505} = 1.55$, $p = 0.19$; **Figure 2.3**).

A total of 173 hoverflies were captured (137 *Toxomerus* sp., 12 *Allograpta* sp., 12 *Syrrita* sp., 1 *Rhingia* sp., 5 *Eristalis* sp., and 6 *E. americanus*). Traps baited with AlphaScents, 40CT313 and TRE8276 captured significantly more hoverflies than traps baited with KLP or unbaited traps (ANOVA $F_{4,505} = 7.49$, $p < 0.001$; **Figure 2.3**).

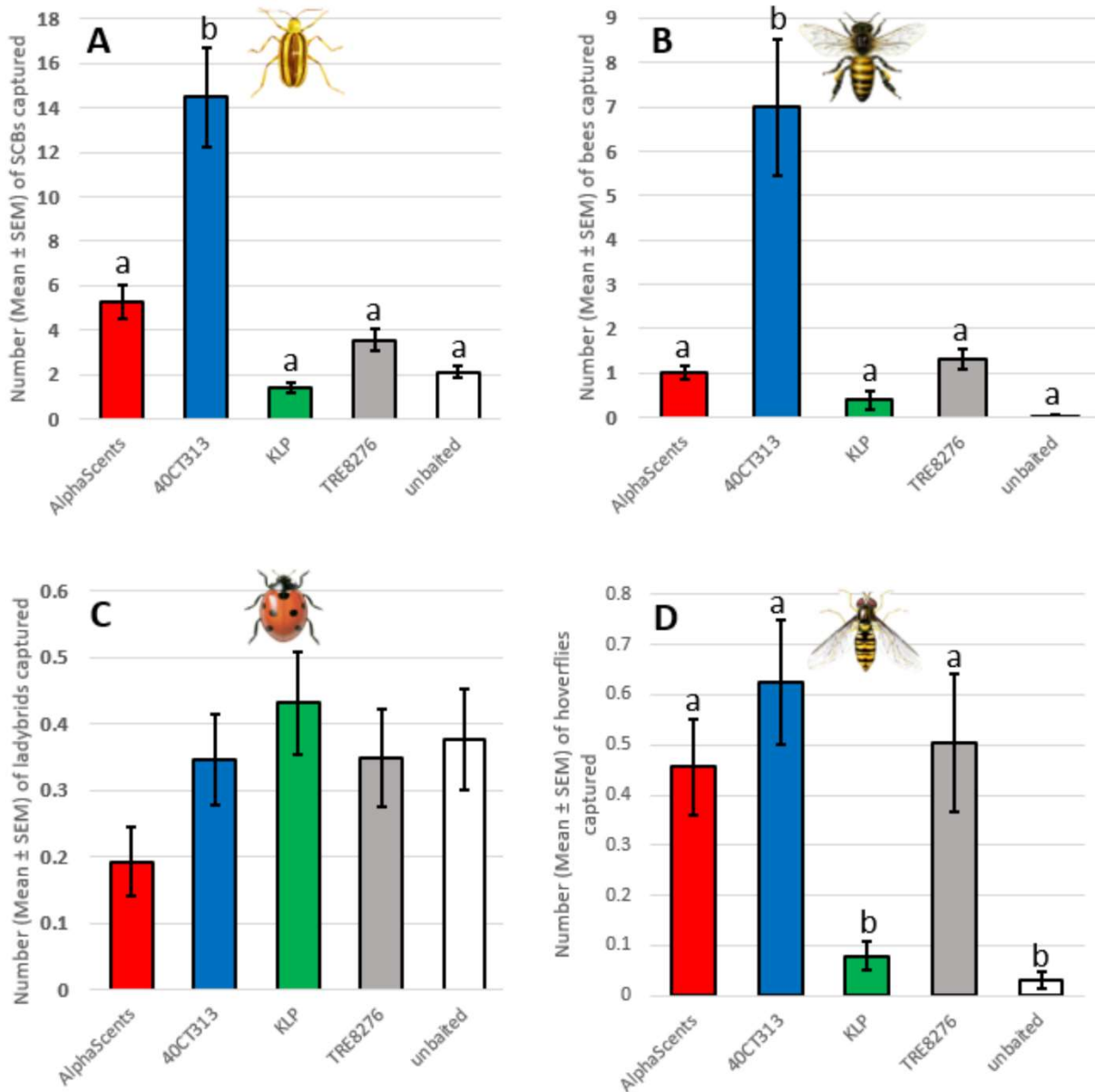


Figure 2.3 Number of SCBs, ladybirds, bees and hoverflies captured in traps baited with different lures (ANOVA, (A) SCB— $F_{4,505} = 22.02$, $p < 0.001$; (B) bees— $F_{4,505} = 15.55$, $p < 0.001$; (C) ladybirds— $F_{4,505} = 1.55$, $p = 0.19$; (D) hoverflies— $F_{4,505} = 7.49$, $p < 0.001$). Different letters above bars indicate significant differences according to the Tukey HSD test ($p < 0.05$)

2.5 Discussion

The main objective of this study was to optimize a SCB trapping method for use in organic cucurbit fields. The optimal trapping method maximizes SCB captures while limiting non-target insect captures. SCB are primary insect pests of cucurbit crops in North America, and alternative control methods are needed due

to the increasing limitations of pesticides [39]. The trapping method's efficacy was established previously in US conventional cucurbit fields by Piñero and Lee (2016) [19]. However, in contrary to this study, many non-target insects were captured in the organic fields. Our results showed that baited traps attract significantly more SCBs, bees, and hoverflies than unbaited traps in organic cucurbit crops. Traps with ten 4 mm in diameter openings per side baited with the 40CT313 attractant optimized SCB captures, while reducing non-target insect captures.

Overall, the 36 traps captured over 1900 SCBs over a nine-week period (3 July to 28 August 2018) during the first experiment, showing that this trapping method can capture SCBs in organic cucurbit crops. Comparatively, Piñero and Lee (2016) had reported 15 traps capturing over 3200 SCBs over the course of 6 weeks (29 April to 14 June 2016), with ratios of SCBs in traps versus SCBs on plants ranging between 7:1 and 23:1. The average amount of SCB per plant had also been greatly suppressed but did not always reduce SCB numbers under the economic threshold [19]. Such ratios and threshold were not examined in our study since the main objective was to determine if baited traps captured more SCBs than unbaited traps, and which trap type and lure could maximize SCB captures while minimizing non-species captures. While our results might be less impressive than Piñero and Lee's, it is important to consider that half the traps used in our study were unbaited, the other half being baited with Trécé TRE8276 lure, whereas Piñero and Lee had used AgBio SCB lure in all their traps. AgBio SCB lure and its equivalent, 40CT313, were not available in Canada in 2018 when the first experiment took place, which could contribute to SCB captures being lower in our first experiment. Furthermore, our experiment took place in a different geographical context, as well as in organic cucurbit productions, whereas Piñero and Lee tested in Missourian conventional cucurbit fields. Finally, stun pills, which are permitted for conventional but not organic use, were used to stun SCBs in Piñero and Lee's experiment, whereas we traps were filled with unscented soapy water to drown the SCBs in our experiment, potentially giving more opportunities for SCBs to escape the traps when entering.

Results from this experiment also indicated that traps baited with semiochemical-based attractants captured 1.70 times more SCBs than unbaited traps. Baited traps also captured 1.20 times more ladybirds, 3.57 times more bees, and 2.16 times more hoverflies than unbaited traps. Insects use both visual and olfactory cues when foraging, making a trapping method using both stimuli more efficient in capturing pest insects such as SCBs, but also non-target insects like pollinators [35,40]. Both conventional and

organic cucurbit productions depend on pollinators to produce fruit, as cucurbits have entomophilic pollination [20]. Thus, the second experiments of this research aimed to reduce these unwanted captures.

The trap type experiment demonstrated that traps perforated with ten 4 mm in diameter openings per side efficiently captured SCB while minimizing non-target species captures. Piñero & Lee (2016) have previously established that yellow jugs with thirty 6 mm in diameter openings made with a paper-hole punch were optimal for SCB trapping in comparison to 10 cm long and 3 mm wide slots made with a Dremel tool or similar slots made with a knife to maximize SCB captures and exclude honeybees [19]. Our experiment showed that traps with 6 mm in diameter openings should be avoided, since they trapped significantly more pollinators and natural enemies, whereas the 4 mm opening traps significantly limited these non-target insects captures. The tool used to make the openings by Piñero and Lee was different, since they used a paper-hole punch whereas a soldering iron was used for this study.

The trap type experiment was the only experiment having blocks as a significant factor for capturing SCBs. This significance could be caused by the disposition of the blocks, as some blocks were closer to paved or dirt roads both farms. Hibernation sites of SCBs are still unclear; however, they have been reported to emerge from leaf litter and dense weeds to feed on alternate host plants until cucurbits are available [3,4]. Roads are barren and provide no refuge nor food for SCBs, which could explain why blocks were a significant factor in this experiment. The type of cucurbit planted within the fields also varied, as both farms mixed different varieties of cucurbits in their crops which could also explain the difference between blocks.

The attractant experiment showed that the 4OCT313 lure attracted significantly more SCBs than other lures. The attractant 4OCT313 is an equivalent of the AgBio 5-compound lure P313-B5, which was previously documented as being the most attractive lure to SCBs by Piñero (2018) [35]. This lure also attracted more bees than other attractants and was more attractive for hoverflies, which was not previously documented. These unwanted captures can be drastically reduced by using the optimal trap from the trap type experiment.

Additionally, over 1700 western corn rootworm beetles, *Diabrotica virgifera virgifera* (Coleoptera: Chrysomelidae), were captured in the traps containing 4OCT313. The western corn rootworm beetles are a problematic insect in corn production, and this unexpected finding could provide insight to finding alternative ways to control this pest.

The purpose of this study was to establish the best trap type and lure for mass trapping SCBs in organic cucurbit farms. Traps with ten 4 mm holes per side with the 40CT313 attractant are the most effective at capturing SCBs while reducing non-target species captures in organic cucurbit farms. While these results are promising, further studies are necessary to establish whether the mass trapping technique of SCBs will effectively maintain SCB populations under the economic thresholds in organic cucurbit fields or not.

2.6 Acknowledgments

We would like to thank the *Samson & Fils* farm and *La Bourrasque* farm for allowing us to use their fields for these experiments. We would also like to thank Jill Vandermeerschen for her help in statistical analysis.

2.7 References

1. Haber, A.I.; Wallingford, A.K.; Grettenberger, I.M.; Ramirez Bonilla, J.P.; Vinchesi-Vahl, A.C.; Weber, D.C. Striped cucumber beetle and western striped cucumber beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Int. Pest Manag.* 2021, 12.
2. Isley, D. The striped cucumber beetle. *Ark. Agric. Exp. Stat. Bull.* 1927, 216, 2–35.
3. Capinera, J. Family Chrysomelidae, Several Subfamilies—Leaf Beetles. In *Handbook of Vegetable Pests*, 2nd ed.; Fernandez, B.J., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2020; pp. 120–122.
4. Iriis Phytoprotection: Fiche Technique de la Chrysomèle Rayée du Concombre. Available online: <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Insecte?imageId=4237#:~:text=Pupe%20%3A%204%2C0%20%C3%A0%206,pattes%20sont%20jaunes%20et%20noires> (accessed on 22 March 2022).
5. Chittenden, F.H. *The Striped Cucumber Beetle and How to Control it*; US Government Print Office: Washington, DC, USA, 1923; pp. 2–6.
6. Cornell University's Insect Diagnostic Laboratory: Factsheet of the Striped Cucumber Beetle. Available online: <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/14356/Striped%20Cucumber%20Beetle.pdf?sequence=2> (accessed on 27 April 2022).
7. Gould, G.E. *The Biology and Control of the Striped Cucumber Beetle*; Purdue University: West Lafayette, IN, USA, 1942; pp. 1–11.
8. Le réseau d'avertissement Phytosanitaire: Factsheet on the Striped Cucumber Beetle. Available online: https://www.agrireseau.net/documents/Document_97620.pdf (accessed on 27 April 2022).
9. Rojas, E.S.; Gleason, M.L.; Batzer, J.C.; Duffy, M. Feasibility of Delaying Removal of Row Covers to Suppress Bacterial Wilt of Muskmelon (*Cucumis melo*). *Plant Dis.* 2011, 95, 729–734.
10. Eilers-Kirk, C.; Fleischer, S.J. Development and Life Table of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae), a Vector of *Erwinia tracheiphila* in Cucurbits. *Environ. Entomol.* 2006, 35, 875–880.
11. Couture, I. Principaux insecticides et fongicides homologués pour les cucurbitacées en 2020. *Agriréseau* 2020, 1, 1–25.
12. Health Canada: Costumer Product Safety. Available online: <https://pr-rp.hc-sc.gc.ca/lr-re/index-eng.php> (accessed on 22 March 2022).

13. SAgE Pesticides: Factcheet of the Toxicology of Pyrethrin. Available online: <https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveID=166&searchText=pyr%C3%A9thrines&isProduct=False> (accessed on 3 March 2022).
14. Porcel, M.; Cotes, B.; Campos, M. Biological and behavioral effects of kaolin particle film on larvae and adults of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Biol. Control*. 2011, 59, 98–105.
15. Brandt, K. Organic Options for Striped Cucumber Beetle Management in Cucumbers. Master's Thesis, Grand Valley State University, Allendale, MI, USA, June 2012.
16. Duval, J. Stratégies gagnantes dans la lutte contre certains insectes ravageurs des cultures maraichères biologiques. In Proceedings of the Centre D'expertise et de Transfert en Agriculture biologique et de Proximité, Québec, QC, Canada, 8 February 2013.
17. Ingwell, L.L.; Thompson, S.L.; Kaplan, I.; Foster, R.E. High tunnels: Protection for rather than from insect pests? *Pest Manag. Sci.* 2017, 73, 2439–2446.
18. eOrganic: Managing Cucumber Beetles in Organic Farming Systems. Available online: <https://eorganic.org/node/5307> (accessed on 22 March 2022).
19. University of Missouri's Integrated Pest Management Faculty: A Novel Mass Trapping System to Control Cucumber Beetles in Cucurbit Crops. Available online: <https://ipm.missouri.edu/cropPest/2016/6/A-novel-mass-trapping-system-to-control-cucumber-beetles-in-cucurbit-crops/> (accessed on 27 April 2022).
20. Ternest, J.J.; Ingwell, L.L.; Foster, R.E.; Kaplan, I. Comparing Prophylactic Versus Threshold-Based Insecticide Programs for Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) Management in Watermelon. *J. Econ. Entomol.* 2020, 113, 872–881.
21. Bomfim, I.; Freitas, B.; Aragão, F.; Walters, F. Pollination in Cucurbit Crops. In *Handbook of Cucurbits: Growth, Cultural Practices and Physiology*, 1st ed.; Pessarakli, M., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016; pp. 181–200.
22. Delaplane, K.; Mayer, D.F. Squash, pumpkin and gourd. In *Crop Pollination by Bees*, 1st ed.; CABI Publishing: New York, NY, USA, 2000; pp. 223–226, 257–259.
23. McGregor, S.E. Cucumber and gherkin, Pumpkin and squash. In *Insect Pollination of Cultivated Crop Plants*, 1st ed.; McGregor, S.E., Ed.; Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1976; Volume 496, pp. 203–208, 306–310.
24. Loreto, F.; Dicke, M.; Schnitzler, J.-P.; Turlings, T.C.J. Plant volatiles and the environment. *Plant Cell Environ.* 2014, 37, 1905–1908.
25. Robert, C.A.M.; Erb, M.; Hibbard, B.E.; Wade French, B.; Zwahlen, C.; Turlings, T.J.C. A specialist root herbivore reduces plant resistance and uses an induced plant volatile to aggregate in a density-dependent manner. *Funct. Ecol.* 2012, 26, 1429–1440.
26. Nunes, C.E.P.; Peñafior, M.F.G.V.; Bento, J.M.S.; Salvador, M.J.; Sazima, M. The dilemma of being a fragrant flower: The major floral volatile attracts pollinators and florivores in the euglossine-pollinated orchid *Dichaea pendula*. *Oecologia* 2016, 182, 933–946.
27. Szendrei, Z.; Rodríguez-Saona, C. A meta-analysis of insect pest behavioral manipulation with plant volatiles. *Entomol. Exp. Appl.* 2010, 134, 201–210.
28. Lewis, P.A.; Lampman, R.L.; Metcalf, R.L. Kairomonal attractants for *Acalymma vittatum* (Coleopter: Chrysomelidae). *Environ. Entomol.* 1990, 19, 8–14.
29. Andersen, J.F.; Metcalf, R.L. Identification of a volatile attractant for *Diabrotica* and *Acalymma* spp. from blossoms of *Cucurbita maxima* Duchesne. *J. Chem. Ecol.* 1986, 12, 687–699.
30. Andrews, E.S.; Theis, N.; Adler, L.S. Pollinator and Herbivore Attraction to *Cucurbita* Floral Volatiles. *J. Chem. Ecol.* 2007, 33, 1682–1691.
31. Metcalf, R.L.; Metcalf, E.R. *Plant Kairomones in Insect Ecology and Control*, 1st ed.; Chapman and Hall Ltd.: London, UK, 1992.

32. Dicke, M.; Takken, W. *Chemical Ecology: From Gene to Ecosystem*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006; Volume 16, pp. 175–189.
33. Light, D.M.; Knight, A.L.; Henrick, C.A.; Rajapaska, D.; Lingren, B.; Dickens, J.C.; Roitman, J. A pear-derived kairomone with pheromonal potency that attracts male and female codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Naturwissenschaften* 2001, 88, 333–338.
34. Martel, J.; Alford, A.; Dickens, J. Synthetic host volatiles increase efficacy of trap cropping for management of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say). *Agric. For. Entomol.* 2005, 7, 79–86.
35. Piñero, J.C. A Comparative Assessment of the Response of Two Species of Cucumber Beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) to Visual and Olfactory Cues and Prospects for Mass Trapping. *J. Econ. Entomol.* 2018, 111, 1439–1445.
36. Milosavljević, I.; Hoddle, C.D.; Mafra-Neto, A.; Gómez-Marco, F.; Hoddle, M.S. Effects of Food Bait and Trap Type on Captures of *Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera: Curculionidae) and Trap Bycatch in Southern California. *J. Econ. Entomol.* 2020, 113, 2407–2417.
37. Cha, D.H.; Gill, M.A.; Epsky, N.D.; Werle, C.T.; Adamczyk, J.J., Jr.; Landolt, P.J. From a non-target to a target: Identification of a fermentation volatile blend attractive to *Zaprionus indianus*. *J. Appl. Entomol.* 2015, 139, 114–122.
38. Spears, L.R.; Looney, C.; Ikerd, H.; Koch, J.B.; Griswold, T.; Strange, J.P.; Ramirez, R.A. Pheromone Lure and Trap Color Affects Bycatch in Agricultural Landscapes of Utah. *Environ. Entomol.* 2016, 45, 1009–1016.
39. Cavanagh, A.; Hazzard, R.; Adler, L.; Boucher, J. Using trap crops for control of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae) reduces insecticide use in butternut squash. *J. Econ. Entomol.* 2009, 102, 1101–1107.
40. Dobson, H.E.M.; Bernays, E. Floral volatiles in insect biology. In *Insect-Plant Interactions*, 1st ed.; Bernays, E.A., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1994; Volume 5, pp. 47–81.

CHAPITRE 3

Failure of a mass trapping program against the striped cucumber beetle *Acalymma vittatum* in organic cucurbit fields

Jessee Tinslay, Marc Fournier, Isabelle Couture, Pierre Lafontaine, Maxime Lefevbre, Éric Lucas

Ce chapitre présente l'article scientifique soumis à *Journal of Economic Entomology* le 5 décembre 2023.

3.1 Abstract

The striped cucumber beetle (SCB) *Acalymma vittatum* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) is one of the most important pests in North American cucurbit crops. While conventional chemical control methods are usually effective in controlling SCB populations, few effective alternative control methods are available for organic cucurbit crops. The goal of the present study was to evaluate an optimized mass trapping system using yellow traps baited with a floral-based semiochemical. More specifically, the objectives were to determine if the trapping method could (1) significantly reduce SCB populations and (2) maintain these populations below the economic threshold throughout the growth season within organic cucurbit crops. The mass trapping significantly reduced SCB populations in two of the six site-year replicates. It had no effect in three of the six site-year replicate, and significantly increased SCB populations in one of the six site-year replicates. Overall, the method did not reduce nor maintain the SCB populations the below the economic threshold of one SCB per plant. Possible causes explaining the diverging results are discussed.

Keywords: Integrated pest management (IPM); Flower volatiles; Plant semiochemicals; Attractants; Organic crop production

3.2 Introduction

Since the beginning of the 20th century, the striped cucumber beetle (SCB) *Acalymma vittatum* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) is a prime pest in North American cucurbit production (Haber *et al.*, 2021; Isley, 1927). Striped cucumber beetles' voltinism ranges from one to three generations per year, typically having only one generation in Canada (Capinera, 2020; Legault, 2007). They emerge from their hibernation sites when ambient temperatures reach 10°C, in spring. Since cucurbits are not abundant in early spring SCBs feed on alternative hosts, including Rosaceae, Asteraceae, and Fabaceae (Capinera, 2020; Couture, 2017). Striped cucumber beetles invade cucurbit fields as soon as seedlings are transplanted or cotyledons appear. An aggregation pheromone, vittatalactone, emitted by male SCBs intensifies the invasion (Morris *et al.*, 2005; Smyth et Hoffmann, 2003). Once SCBs have established themselves, they feed and breed on the cucurbits throughout the growth season (Capinera, 2020). In Quebec, Canada, two population peaks occur per year. The first peak happens in late spring, when overwintered adults leave alternative hosts to invade freshly emerging cucurbit fields. The second peak takes place in July following the emergence of the new generation (Couture, 2017).

Striped cucumber beetles cause direct damage by feeding on the roots, leaves, flowers, and fruits of cucurbits (Haber *et al.*, 2021; Latin et Reed, 1985). They may also transmit bacterial wilt, *Erwinia tracheiphila*, one of the most damaging cucurbit diseases which can cause up to 80% of cucurbit crop losses (Ellers-Kirk et Fleischer, 2006; Richard et Boivin, 1994; Rojas, E. Saalau *et al.*, 2011). To ensure maximal yields of cucurbit crops, the economic threshold varies between 0.5 SCB per plant for cucumbers (*Cucumis sativus* (L.)), kabocha and buttercup squash (*Cucurbita maxima* (Duchesne)) and spaghetti squash, *Cucurbita pepo* (L.), to one SCB per plant for other cucurbits (Couture, 2017).

Striped cucumber beetles prefer foraging on certain cucurbits such as the Blue Hubbard squash (*C. maxima*), buttercup squash (*C. maxima*) and zucchinis (*C. pepo*) which are sometimes used as trap crops to control SCBs (Boucher *et al.*, 2004; Brzozowski *et al.*, 2016; Cavanagh *et al.*, 2009).

Striped cucumber beetles use visual cues when foraging. Yellow is detected by SCBs to find cucurbit blossoms and is highly attractive to SCBs (Piñero, 2018). Striped cucumber beetles also use olfactory cues to find cucurbits. Indole, 1,2,4-trimethoxybenzene, and (E)-cinnamaldehyde, abbreviated TIC, are a combination of plant semiochemicals emitted by cucurbits which attract both pollinators and SCBs (Andersen et Metcalf, 1986; Andrews *et al.*, 2007; Metcalf *et al.*, 1995; Metcalf et Metcalf, 1992).

While many chemical control methods efficiently reduce SCBs beneath the economic threshold, organic producers have limited options to control SCBs. In Canada, two organic pesticides are allowed for SCB control: Safer's® Insecticide Trounce, a pyrethrin-based pesticide reported as highly toxic to bees (Sage pesticides, 2022) and must be applied in the evening to mitigate its harmful effects, and Surround® WP, a kaolin clay that can disturb oviposition of non-target insects and washes off during rain showers (Couture, 2020; Haber *et al.*, 2021; Sage Pesticides, 2022; Porcel *et al.*, 2011). Additionally, insect-exclusion nets, crop rotation, trap crops, and plastic tunnels are non-chemical alternatives to protect small-scale cucurbit cultivars in Quebec. These methods have significant limitations such as the duration of use, the cost, and the effort required for installation (Brandt, 2012; Haber *et al.*, 2021; Sage Pesticides, 2022; Snyder, 2019).

A SCB mass trapping method developed by Jaime Piñero and Rusty W. Lee in 2016 was successfully tested in Missouri (Piñero *et al.*, 2016). This method involves placing baited traps in cucurbit crops. The commercially available baits are made of plant-derived semiochemicals, more specifically cucurbits' volatile compounds. In 2018-2019, a previous study using this method in a different geographical context, i.e., Quebec organic cucurbit crops, allowed to improve trap effectiveness while reducing non-target effects, such as the capture of pollinators and other beneficial insects (Tinsley *et al.*, 2022). These interesting results must be confirmed at a larger commercial scale.

The objective of the present study was to determine the efficacy of the optimized trapping method for controlling SCB populations in commercial organic cucurbit fields in Quebec. We predicted that mass trapping would (1) significantly reduce the average number of SCB per plant and (2) maintain the SCB populations below the economic threshold of 1 SCB per plant.

3.3 Materials and Method

3.3.1 Study sites

The experiment was conducted during the 2020 and 2021 cucurbit growth season (from June 10th to September 16th 2020, and from June 8th to September 21st 2021) in three sites located in the Southern area of Quebec, Canada: (1) *La Bourrasque* organic farm in Saint-Nazaire-d'Acton (45°74'N, 72°65'W), (2) *Samson & fils* organic farm in Farnham (45°25'N, 72°96'W), and (3) The Research and Development Institute for the Agri-environment (IRDA) in Saint-Bruno-de-Montarville (45°55'N, 73°35'W). Three fields

per site underwent the same experiment. In all three sites, the fields were plowed the previous fall and the rows in each cucurbit field were prepared with raised beds 1.2 m wide × 0.15 m.

In Saint-Nazaire-d'Acton, in 2020 and 2021, fields had 15 rows measuring approximately 150 m in length. The beds were uncovered and occasionally weeded by hand. In 2020, the organic crop protectant Surround® was applied to the cucurbit fields prior to the first sampling (June 18th 2020) in two fields. Two fields had *Cucurbita moschata* (Duchesne) (butternut squash) and *C. pepo* (pie pumpkins and acorn squashes) mixed in the rows. A third field was planted with *Citrullus lanatus* (Matsumara et Nakai) (watermelons). All three fields underwent a Trounce® treatment on 2 July 2020 to reduce SCB populations in the fields. In 2021, one field was seeded with *C. moschata* (butternut) and a mixed variety of *C. pepo* (delicata, spaghetti & acorn squashes) squashes. A second field was seeded with *C. pepo* (zucchini). A third field was seeded with *Cucumis sativus* (L.) (cucumbers). Neither fungicides nor insecticides were used in the fields in 2021.

In Farnham, both in 2020 and 2021, the fields tested had 10 rows measuring approximately 500 m in length, the beds were uncovered and the areas between rows were weeded either by hand or with a mechanical row cleaner. The fields were mostly planted with *C. moschata* (butternut squash) and intermixed with *C. pepo* (delicata, spaghetti squashes, acorn squashes and pumpkins) in the rows. Neither fungicides nor insecticides were used in the fields in 2020, and the organic insecticide Trounce® was applied in the fields on July 9th, 2021.

In Saint-Bruno-de-Montarville, in 2020 and 2021, fields had 6 rows measuring 100 m in length, the row beds were uncovered in 2020 and were covered in plastic mulch in 2021 and were occasionally weeded by hand or mechanically. In 2021, an irrigation system was added to the cucurbit plots in this location due to heavy drought in the beginning of the growth season. Both years, only one type of cucurbit was planted in the plots: the Blue Hubbard squash, a variety of *C. maxima*, one of the most attractive cucurbits to SCB (Boucher *et al.*, 2004; Cavanagh *et al.*, 2009). No fungicides nor insecticides were used in Saint-Bruno-de-Montarville.

3.3.2 Trapping experiment

The SCB traps used were designed according to Tinslay *et al.* 2022. Yellow plastic milk jugs (3.8L) were pierced using a 4 mm in diameter soldering iron. Two series of five holes were perforated horizontally on each side of the jugs. In a previous study, it was demonstrated that 4 mm in diameter openings greatly

reduced non-target species captures, such as bees and ladybirds while effectively capturing SCBs in comparison larger openings (5 mm and 6 mm in diameter) (Tinslay *et al.*, 2022). The study also found that fewer holes, i.e., two series of five holes per side, were just as effective at capturing SCBs than two series of 10 holes per side. The traps were spray-painted yellow with a high gloss paint (Krylon® sun yellow) to improve SCB attraction (Piñero, 2018). Each trap was filled with 1 L of unscented soapy water. A semiochemical-based lure was inserted through the mouth of each jug and suspended using a twist tie. The twist tie was secured using the screw-top lid. The lure used was the 40CT313 5-compound lure (Distribution Solida Inc., Saint-Ferréol-les-Neiges, QC, Canada), the details of the five compounds of the 40CT313 lure were not disclosed. In Tinslay's previous study, this lure was found to be the most efficient at capturing SCBs (Tinslay *et al.*, 2022). This lure is equivalent to AgBio's 5-compound lure P313-B5 (AgBio Inc., Westminster, CO), which Piñero had found to be most attractive to SCBs in his research (Piñero, 2018). The lure was not changed during the experiment.

Each cucurbit field was split in two paired treatments; a side protected by traps and an unprotected side with no traps. The two treatments were distanced 15 m apart. Traps were installed 0.45 m above the ground and placed 5 m from one another along the edge of the ditch or forest bordering the fields, the distance between the traps and the first row of cucurbits varied depending on the field, ranging from 1 m to 2 m. The first trap of each field was placed 15 m away from the plot edge to avoid border effect. The number of traps installed ranged from 8 to 13 traps along the fields depending on the size of the fields (larger fields had more traps than smaller ones). Although some fields were up to 500 m in length, the studied areas of the fields ranged between 100 and 150 m in length in total, the rest of the field being excluded from the experimental design whenever applicable. Traps were installed at Saint-Nazaire-d'Acton on June 11th, 2020, and June 26th 2021, at Farnham on June 16th 2020 and June 17th 2021, and at Saint-Bruno-de-Montarville on June 3rd 2020 and June 1st 2021.

The traps were visited every week after their installation to count the trapped SCBs and to change the soapy water within the traps. To count the SCBs, the contents of the traps were emptied onto a sweep net to collect the drowned SCBs and count them *in situ*.

3.3.3 Surveying SCB thresholds

Plants were surveyed every week during the cucurbit growth season (from June 10th to September 16th, 2020, and from June 8th to September 21st, 2021). SCBs were surveyed on thirty cucurbit plants per plot,

for a total of 60 plants per field (replicate). Ten plants per row in the first three rows nearest to traps were randomly selected and scouted. Before inflorescence, the entire plants i.e., leaves and stems, were examined to count SCBs present on the plant. Once inflorescence began, two flowers per plant were observed as plants became too large to fully examine and SCBs mostly agglomerated in flowers. This method is also used by agronomists in Quebec.

Statistical analysis

To determine whether traps influenced SCB populations within cucurbit fields, the average number of SCBs per plant, per week, per treatment and per field were compared using a paired Wilcoxon rank-sum test at the $p < 0.05$ level for each site and year. We used a generalized linear model (GLM) with the quasipoisson family to investigate the effects of treatment, year of data collection, date of data collection, and site on the average number of SCBs per plant in our study. The fixed effect were the treatments, whereas the random effects were the year of data collection, date of data collection and site. The Wilcoxon rank-sum test and quasipoisson family accommodated the overdispersion of our non-parametric data. Statistical analyses in this study were performed using R statistical software version 4.1.0 using [tidyverse], [dplyr], [ggpubr], [rstatix], [MASS] and [ggplot2] libraries (R Core Team, 2021). The data were not transformed prior to analysis.

3.4 Results

Over the course of the 2-year experiment a total 8889 SCBs were captured in the three experimental sites (4589 SCBs at Saint-Bruno-de-Montarville site in 2020, and 211 in 2021, 2098 SCBs at Farnham in 2020, and 276 in 2021, 1213 at Saint-Nazaire-d'Acton in 2020, and 502 in 2021). Summer of 2021 was exceptionally dry, which could explain the great difference in SCB captures between years.

3.4.1 Factors influencing average number of SCB per plant

The results of the GLM on the non-transformed data are presented in Table 3.1. The intercept represents the expected average number of SCB per plant when all predictors are at their reference level (i.e., treatment (unprotected), year 2020, first date of data collection, site Farnham). The treatment (areas protected by traps) was not significant ($t=-0.79$, $p=0.43$), indicating that there was no difference in the average number of SCB per plant between the two treatments (unprotected and protected). The year variable was significant ($t=3.96$, $p<0.001$), indicating that the average number of SCB per plant was significantly lower in 2021 than in 2020. The date variable was also significant ($t=-3.96$, $p<0.001$), indicating that the average number of SCB per plant was influenced by date of the data collection. Finally, the site

variable was significant for Saint-Bruno-de-Montarville ($t=10.70$, $p<0.001$) and Saint-Nazaire-d'Acton ($t=2.99$, $p=0.003$) when compared with the Farnham intercept, meaning there was a significant difference among the sites. A post-hoc Tukey test also showed a significant difference between Saint-Bruno-de-Montarville and Saint-Nazaire-d'Acton (Post-hoc Tukey test, estimate=-0.7378, Std. Error=0.1342, z-value=-5.497, $p<0.001$).

The null deviance and residual deviance were 591.32 and 409.80, respectively, indicating that the model explained a significant amount of the variation in the response. We removed 77 observations from the original dataset due to missing values. Overall, our GLM analysis suggests that year, date of data collection, and site are important predictors of the average number of SCB per plant in our study.

Table 3.1 Results of the generalized model of factors, i.e., site, date, and year, explaining the average number of striped cucumber beetles (SCB) per plant.

Variable	Estimate	Std. Error	t	p
Intercept	122.45	32.10	3.82	<0.001
Treatment (protected)	-0.08	0.10	-0.85	0.40
Year 2021	0.41	0.10	4.01	<0.001
Date	-0.01	0.00	-3.85	<0.001
Site St-Nazaire	0.89	0.20	4.42	<0.001
Site St-Bruno-de-Montarville	1.65	0.17	9.64	<0.001

3.4.2 Treatment effect on SCB populations

In Farnham, in 2020, there was a significant difference in the mean number of SCBs per plant between the protected and unprotected areas in the cucurbit fields. The unprotected side had 1.97 ± 0.137 times more SCBs per plant than the protected side (Wilcoxon rank-sum test, $V=123$, $p=0.005$, **Figure 3.1-A**). In 2021, there was no difference between the two treatments (Wilcoxon rank-sum test, $V=273$, $p=0.62$, **Figure 3.1-B**).

In Saint-Bruno-de-Montarville, in 2020, there was no significant difference between both treatments (Wilcoxon rank-sum test, $V=543.5$, $p=0.40$, **Figure 3.2-A**), whereas there was a significant difference in 2021, where the unprotected area of the fields had 1.26 ± 1.52 times more SCBs per plant than the protected area (Wilcoxon rank-sum test, $V=828$, $p=0.001$, **Figure 3.2-B**).

In Saint-Nazaire-d'Acton in 2020, there were 1.44 ± 1.88 times more SCBs per plant in the protected area than the unprotected area (Wilcoxon rank-sum test, $V=34$, $p=0.03$, **Figure 3.3-A**) and no difference between sides in 2021 (Wilcoxon rank-sum test, $V=134.5$, $p=0.67$, **Figure 3.3-B**).

3.4.3 Economic threshold

In Farnham in 2020, the economic threshold of 1 SCB per plant was not exceeded prior to the 5-leaf stage, nor during the entire growth season in both treatments (**Figure 3.1-A**). Surveying and maintaining the SCB population below thresholds is particularly important in spring prior to 5-leaf stage as bacterial wilt severely impacts young plants (Eaton, 2016; Evans et Renkema, 2018; Haber *et al.*, 2021; Rojas, Erika Saalau *et al.*, 2015). In 2021, the threshold was not exceeded prior to the 5-leaf stage but was surpassed during the month of July in the protected treatment, and during the last week in July in the unprotected treatment (**Figure 3.1-B**). In 2020, there was an important decrease in captures during the second half of July, however, captures increased in August (**Figure 3.1-C**). In 2021, captures increased only in August and the beginning of September (**Figure 3.1-D**).

In Saint-Bruno-de-Montarville in 2020, the economic threshold was exceeded from the beginning of data collection until mid-August in both treatments (**Figure 3.2-A**). In 2021, the economic threshold was surpassed the entire growth season except for the first 3 weeks of September 2021 (**Figure 3.2-B**). In both years, the exact date where plants reached the 5-leaf stage is unknown. However, the plants were infested above threshold levels in their early stages. In 2020, captures peaked in the first weeks of July, whereas in 2021, they peaked the third week of August.

In Saint-Nazaire-d'Acton in 2020, the economic threshold of 1 SCB/plant was only exceeded during one week in the protected area of the field prior to the 5-leaf stage, whereas it was surpassed the entire month of July 2020 (**Figure 3.3-A**). In 2021, it is unknown whether the economic threshold was surpassed prior to the 5-leaf stage as data was collected after they had reached this stage. The economic threshold was exceeded the first two weeks of July and the month of September (**Figure 3.3-B**). In 2020, captures reached their peak at the end of July (**Figure 3.3-C**). In 2021, most captures occurred in September (**Figure 3.3-D**).

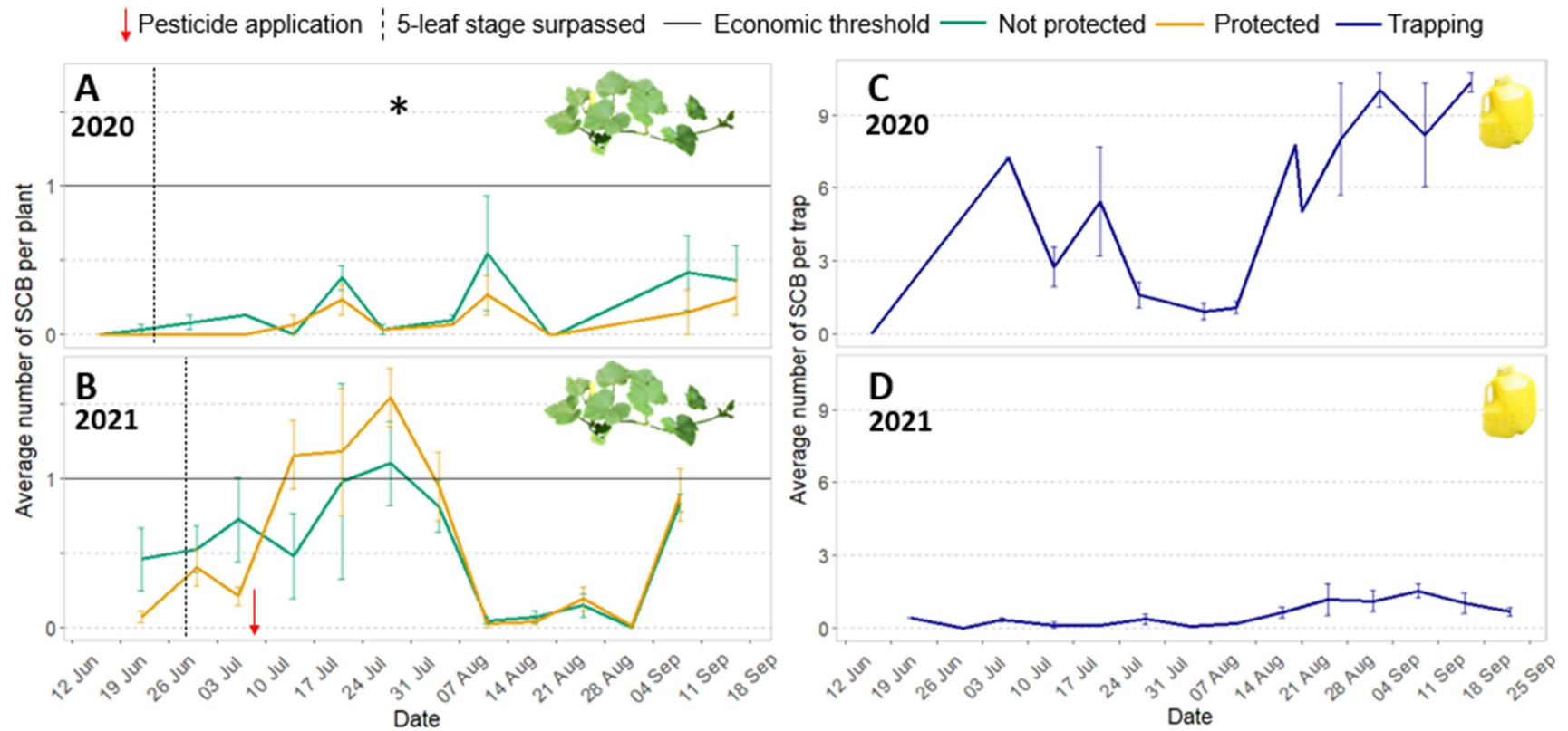


Figure 3.1 Average number of SCBs per plant in Farnham in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Farnham in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.05$.

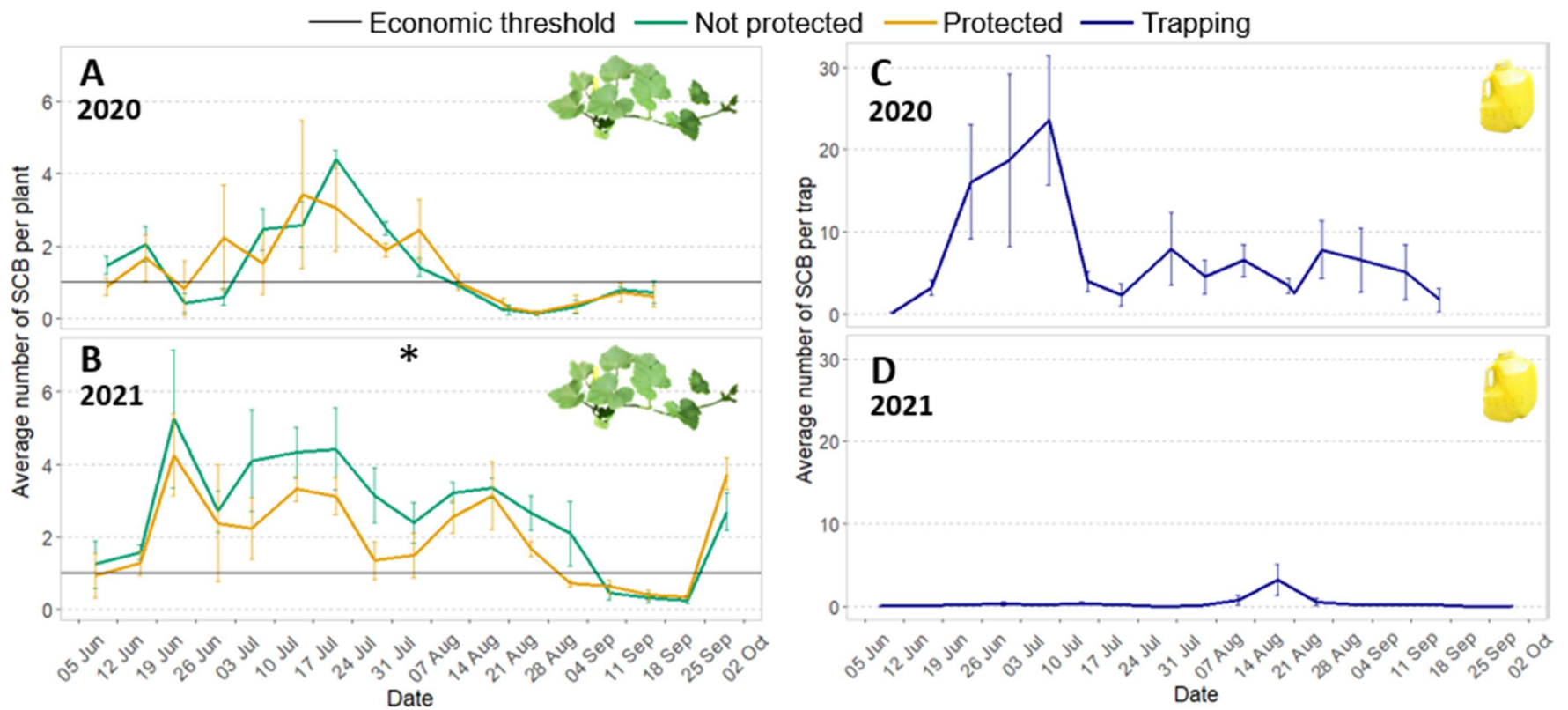


Figure 3.2 Average number of SCBs per plant in Saint-Bruno-de-Montarville in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Saint-Bruno-de-Montarville in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.05$.

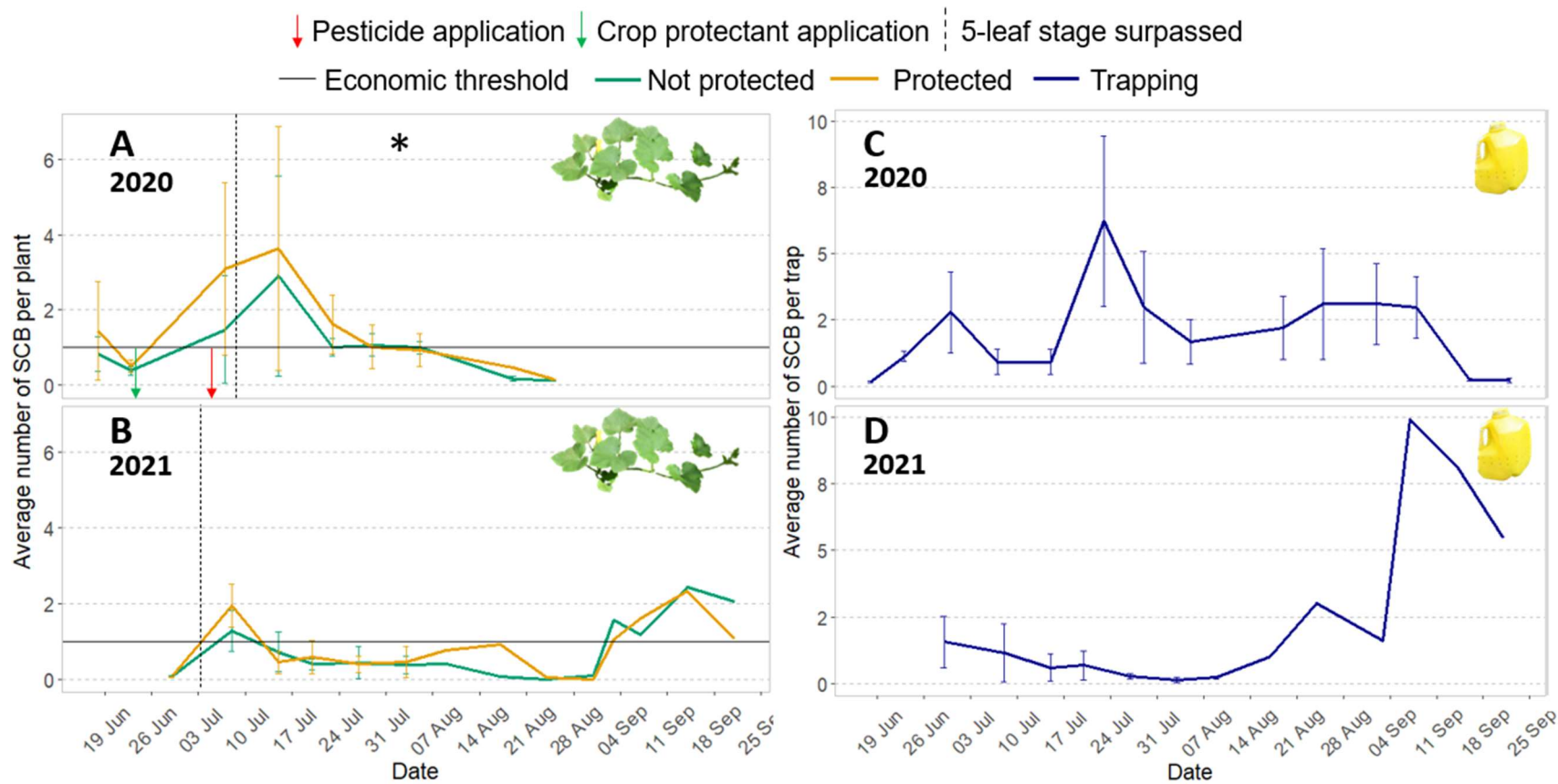


Figure 3.3 Average number of SCBs per plant in Saint-Nazaire-d'Acton in protected and unprotected areas of cucurbits in (A) 2020 and (B) 2021, and average number of SCBs captured per trap in Saint-Nazaire-d'Acton in (C) 2020 and (D) 2021. Asterisks indicate significant differences between treatments according to the Wilcoxon rank-sum test at $p < 0.0$

3.5 Discussion

The SCB mass trapping program did not efficiently protect the cucurbit crops. Controlling SCB population is especially important in the early stages of plant development as cucurbits are most susceptible to bacterial wilt before the 5-leaf stage (Eaton, 2016; Gardner *et al.*, 2015; Haber *et al.*, 2021). The treatments were not significant predictors of SCBs populations in the fields, meaning that the presence or absence of traps did not influence the beetle numbers in the fields. In general, the trapping method failed to lower or sustain SCB numbers below the economic threshold of one SCB per plant.

Overall, eight times more SCBs were captured in 2020 than 2021 in all sites. More specifically, the number of captures in Saint-Bruno-de-Montarville was 21.8 times higher in 2020 than in 2021. Similarly, there were 7.6 times more captures in Farnham and 2.4 times more in Saint-Nazaire-d'Acton in 2020 compared to 2021.

Although the trapping method was not always successful in reducing the average number of SCBs per plant in the protected areas, there were instances where significant differences were observed in the average number of SCBs per plant between protected and unprotected areas. Three different situations among the six site-year repetitions: (1) no difference between treatments 3 site-year replicates, (2) a decrease of SCBs per plant in the protected areas in 2 site-year replicates, and (3) the opposite result, where there were more SCBs per plant in the protected area in 1 site-year replicate. These observations clearly establish that the trapping method is not reliable, therefore cannot be recommended to producers.

Uncontrolled factors

Population dynamics, flowering periods, meteorological conditions, prevailing winds, cultural practices, neighbouring landscapes, cucurbit species/variety and cucurbit field placement were uncontrolled factors that may have influenced results (Couture, 2017; Willis Chan et Raine, 2021; Ministère de l'Environnement de la Faune et des Parcs, 2021; Boucher, T. Jude, 2007; Boucher, T Jude et Durgy, 2004; Cavanagh *et al.*, 2009).

3.5.1 Trapping method potential

Despite the contrasting results, the trapping method may still hold some potential for integrated pest management strategies. There were instances (2 of 6 site-year repetitions) where sides protected by traps had significantly reduced SCB populations and more SCBs were captured by the traps, meaning that traps were at least partially effective in capturing SCBs although they did not consistently reduce SCB populations. There might be a combination of situations where trapping could be included in IPM strategies. For example, the use of plastic mulch could make it more difficult for SCB to lay eggs in and emerge from the soil since and could complement the trapping system. Another possibility could be using the trapping system in fields surrounded by forests/shielded by the wind since odor plumes emitted by the traps might be too diffuse when fields are surrounded by open landscapes.

3.6 Conclusion

The objective of this study was to determine the effectiveness of a mass trapping method in organic cucurbit farms. The trapping method is ineffective at reducing and maintaining SCB populations below economic thresholds within cucurbit fields. Traps should be especially effective in spring, prior to cucurbit plants reaching the 5-leaf stage due to the severe damage caused by bacterial wilt in early plant stages, which is not the case. Further tests should be conducted where the traps should be evaluated in conjunction with other management methods in an integrated pest management context, to determine whether trapping could be an interesting tool to increase the effectiveness of organic control methods. The disposition of traps within cucurbit fields could also be explored since traps in this study were placed along only one side of the fields.

Another potential alternative worth exploring would be using a synthesized version of the aggregation pheromone, vittatalactone, as bait inside the traps instead of synthetic cucurbit volatile compounds as used in this study (Weber, 2018). Vittatalactone plays an important role in both male and female SCBs aggregating in cucurbit fields in the beginning of the growth season when seedlings are still vulnerable (Eaton, 2016; Haber *et al.*, 2021; Morris *et al.*, 2005; Rojas, Erika Saalau *et al.*, 2015; Smyth et Hoffmann, 2003). This alternative could have a greater reducing effect of SCB populations within cucurbit fields.

3.7 Acknowledgment

We would like to thank the Samson & Fils farm, the Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) and la Bourrasque farm for allowing us to use their fields for these experiments. We would also like to thank Jill Vandermeersch for her help in statistical analysis.

3.8 References

- Andersen, J. F. et Metcalf, R. L. (1986, 1986/03/01). Identification of a volatile attractant for *Diabrotica* and *Acalymma* spp. from blossoms of *Cucurbita maxima* duchesne. *Journal of chemical ecology*, 12(3), 687-699. <https://doi.org/10.1007/BF01012102>
- Andrews, E. S., Theis, N. et Adler, L. S. (2007, 2007/09/01). Pollinator and Herbivore Attraction to Cucurbita Floral Volatiles. *Journal of chemical ecology*, 33(9), 1682-1691. <https://doi.org/10.1007/s10886-007-9337-7>
- Boucher, T. J. (2007). *Striped Cucumber Beetles*. Integrated Pest Management - University of Connecticut. <https://ipm.cahn.uconn.edu/striped-cucumber-beetles/>
- Boucher, T. J. et Durgy, R. (2004). Demonstrating a perimeter trap crop approach to pest management on summer squash in New England. *J. Extension*, 42, 1-8. <https://tigerprints.clemson.edu/joe/vol42/iss5/13>
- Brandt, K. (2012). *Organic options for striped cucumber beetle management in cucumbers*. [Mémoire de maîtrise, Grand Valley State University]. Scholarworks@gvsu. <https://scholarworks.gvsu.edu/theses/29/?utm>
- Brzozowski, L., Leckie, B. M., Gardner, J., Hoffmann, M. P. et Mazourek, M. (2016). *Curcubita pepo* subspecies delineates striped cucumber beetle (*Acalymma vittatum*) preference. *Horticulture Research*, 3(1), 16028. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.28>
- Capinera, J. (2020). *Handbook of vegetable pests* (2^e éd.). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814488-6.00005-4>
- Cavanagh, A., Hazzard, R., Adler, L. et Boucher, J. (2009). Using trap crops for control of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae) reduces insecticide use in butternut squash. *Journal of Economic Entomology*, 102(3), 1101-1107. <https://doi.org/10.1603/029.102.0331>
- Couture, I. (2017). *Fiche technique de la chrysomèle rayée du concombre*. IRIIS phytoprotection. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Insecte?imageId=4237#:~:text=Pupe%20%3A%204%2C0%20%C3%A0%206,pattes%20sont%20jaunes%20et%20noires>
- Couture, I. (2020). *Principaux insecticides et fongicides homologués pour les cucurbitacées en 2020* Agriréseau (vol. 1) [Bulletin d'information]. Agriréseau. https://www.agrireseau.net/rap/documents/105554/cucurbitacees-bulletin-d_information-no-1-principaux-insecticides-et-fongicides-homologues-pour-les-cucurbitacees-en-2021

- Eaton, A. (2016). *Striped Cucumber Beetle Pest Fact Sheet 20* [Factsheet]. University of New Hampshire. https://extension.unh.edu/sites/default/files/migrated_unmanaged_files/Resource000554_Rep576.pdf
- Ellers-Kirk, C. et Fleischer, S. J. (2006). Development and Life Table of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae), a Vector of *Erwinia tracheiphila* in Cucurbits. *Environmental Entomology*, 35(4), 875-880. <https://doi.org/10.1603/0046-225x-35.4.875>
- Evans, B. et Renkema, J. (2018). Striped Cucumber Beetle *Acalymma vittatum* F. (Insecta: Coleoptera: Chrysomelidae). *EDIS*, EENY-707. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/IN1215>
- Gardner, J., Hoffmann, M. P. et Mazourek, M. (2015). Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) Aggregation in Response to Cultivar and Flowering. *Environmental Entomology*, 44(2), 309-316. <https://doi.org/10.1093/ee/nvu061>
- Haber, A. I., Wallingford, A. K., Grettenberger, I. M., Ramirez Bonilla, J. P., Vinchesi-Vahl, A. C. et Weber, D. C. (2021). Striped cucumber Beetle and Western Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 12(1). <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa026>
- Isley, D. (1927). *The striped cucumber beetle* (Bulletin n°. 216). [Bulletin d'information]. Arkansas Agricultural Experiment Station Bulletin. <https://digitalcollections.uark.edu/digital/collection/ArkBulletins/id/277/rec/1>
- Latin, R. et Reed, G. (1985). Effect of root feeding by striped cucumber beetle larvae on the incidence and severity of fusarium wilt of muskmelon. *Phytopathology*, 75(2), 209-211. https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1985Articles/Phyto75n02_209.PDF
- Legault, G. (2007). *Effect of kaolin on the striped cucumber beetle (Acalymma vittatum) and cucumber growth and development*. [Mémoire de maîtrise, Université McGill]. eScholarships@McGill. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/kh04ds42h>
- Metcalf, R. L., Lampman, R. L. et Deem-Dickson, L. (1995). Indole as an olfactory synergist for volatile kairomones for diabroticite beetles. *Journal of chemical ecology*, 21(8), 1149-1162. <https://doi.org/10.1007/BF02228317>
- Metcalf, R. L. et Metcalf, E. R. (1992). *Illinois Natural History Survey Bulletin : Plant kairomones in insect ecology and control*. (Vol. 33) [Bulletin d'information]. New York: Chapman and Hall. <https://core.ac.uk/download/pdf/10210238.pdf#page=47>
- Ministère de l'Environnement de la Faune et des Parcs. (2021). *Faits saillants, Juin 2021: une chaleur record dans plusieurs localités du sud du Québec*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2021/juin.htm>
- Morris, B. D., Smyth, R. R., Foster, S. P., Hoffmann, M. P., Roelofs, W. L., Franke, S. et Francke, W. (2005). Vittatalactone, a β -Lactone from the Striped Cucumber Beetle, *Acalymma vittatum*. *Journal of Natural Products*, 68(1), 26-30. <https://doi.org/10.1021/np049751v>

- Piñero, J. C. (2018). A Comparative Assessment of the Response of Two Species of Cucumber Beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) to Visual and Olfactory Cues and Prospects for Mass Trapping. *Journal of Economic Entomology*, 111(3), 1439-1445. <https://doi.org/10.1093/jee/toy094>
- Piñero, J., et Lee, R. (2016). A novel mass trapping system to control cucumber beetles in cucurbit crops. *Integrated Pest Management University of Missouri*, Missouri Environment & Garden. 4-8. <https://ipm.missouri.edu/MEG/archive/2016/v22n6.pdf>
- Porcel, M., Cotes, B. et Campos, M. (2011). Biological and behavioral effects of kaolin particle film on larvae and adults of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Biological Control*, 59(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.07.011>
- Richard, C. et Boivin, G. (1994). *Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada*. Société canadienne de phytopathologie et Société d'entomologie. <https://phytopath.ca/publications/maladies-et-ravageurs-des-cultures-legumieres-au-canada/>
- Rojas, E. S., Batzer, J. C., Beattie, G. A., Fleischer, S. J., Shapiro, L. R., Williams, M. A., Bessin, R., Bruton, B. D., Boucher, T. J., Jesse, L. C. H. et Gleason, M. L. (2015). Bacterial Wilt of Cucurbits: Resurrecting a Classic Pathosystem. *Plant Disease*, 99(5), 564-574. <https://doi.org/10.1094/pdis-10-14-1068-fe>
- Rojas, E. S., Gleason, M. L., Batzer, J. C. et Duffy, M. (2011). Feasibility of Delaying Removal of Row Covers to Suppress Bacterial Wilt of Muskmelon (*Cucumis melo*). *Plant Disease*, 95(6), 729-734. <https://doi.org/10.1094/pdis-11-10-0788>
- Sage Pesticides (2022). *Fiche matière active : Toxicologie de la matière active : pyréthrinés*. [Fiche]. <https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveID=166&searchText=pyr%C3%A9thrines&isProduct=False>
- Shee, C. N. (2022). *Developing attractants and deterrents for a push-pull striped cucumber beetle management system* [Dissertation, Purdue University Graduate School]. Purdue University. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Developing_attractants_and_deterrents_for_a_push-pull_striped_cucumber_beetle_management_system/19876366
- Smyth, R. R. et Hoffmann, M. P. (2003). A male-produced aggregation pheromone facilitating *Acalymma vittatum* F.(Coleoptera: Chrysomelidae) early-season host plant colonization. *Journal of insect behavior*, 16(3), 347-359. <https://doi.org/10.1023/A:1024824025210>
- Snyder, W. E. (2019). Managing Cucumber Beetles in Organic Farming Systems. *eOrganics*. <https://eorganic.org/node/5307>
- Tinslay, J., Fournier, M., Couture, I., Lafontaine, P. J., Lefebvre, M. et Lucas, E. (2022). Optimization of a Mass Trapping Method against the Striped Cucumber Beetle *Acalymma vittatum* in Organic Cucurbit Fields. *Insects*, 13(5), 465. <https://doi.org/10.3390/insects13050465>
- Weber, D. C. (2018). Field Attraction of Striped Cucumber Beetles to a Synthetic Vittatalactone Mixture. *Journal of Economic Entomology*, 111(6), 2988-2991. <https://doi.org/10.1093/jee/toy283>

Willis Chan, D. S. et Raine, N. E. (2021). Hoary Squash Bees (*Eucera pruinosa*: Hymenoptera: Apidae) Provide Abundant and Reliable Pollination Services to Cucurbita Crops in Ontario (Canada). *Environmental Entomology*, 50(4), 968-981. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab045>

CHAPITRE 4

Conclusion générale

Les producteurs de cucurbitacées en régie biologique ont des options limitées en matière de contrôle des ravageurs tels que la CRC. L'objectif principal du présent projet était d'optimiser et évaluer une stratégie de piégeage massif de la chrysomèle rayée du concombre en culture biologique basée sur une méthode développée par Piñero & Lee (2016) au Missouri (USA). Les expériences du présent mémoire ont été réalisées au champ en régie biologique dans le contexte géographique des paysages agricoles du sud du Québec.

Les objectifs spécifiques étaient 1) d'optimiser une technique de piégeage de masse en déterminant un type de piège et un attractif optimaux pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant celles des pollinisateurs et des ennemis naturels et 2) d'évaluer le piégeage massif de la CRC en culture biologique de cucurbitacées en champs en utilisant le piège et l'attractif trouvés les plus performants au premier objectif.

Le deuxième chapitre porte sur l'évaluation du potentiel de la technique de piégeage massif de Piñero & Lee et l'optimisation du piège. L'évaluation du potentiel de la technique de piégeage massif avait été effectuée de façon préliminaire en 2018, avant le début de la présente recherche (Tinslay *et al.*, 2022). Cette expérience préliminaire concluait que les pièges contenant des attractifs piégeaient davantage de CRC que les pièges sans attractifs. Néanmoins, les pièges appâtés piègent également significativement plus d'insectes non-cibles, notamment des syrphes et des abeilles.

La première expérience consistait à optimiser la technique de piégeage de masse en déterminant un type de piège optimal pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant celle des insectes utiles. Cette expérience a démontré que le piège optimal possède dix trous par côté de 4 mm de diamètre, ce

qui permet de maximiser les captures de CRC tout en minimisant celle d'insectes non-cibles. L'hypothèse 1 stipulant qu'un piège avec une taille et un nombre d'ouvertures optimaux permet de maximiser les captures de CRC tout en minimisant les captures d'insectes non-cibles est donc validée. Parmi les cinq types de pièges testés, les pièges possédant les trous de 4 mm de diamètre réduisent considérablement les captures d'abeilles et coccinelles dans les pièges, tout en capturant des quantités similaires de CRC comparés aux pièges qui possèdent des trous de 5 mm et 6 mm. Le nombre de trous par côté n'affecte pas significativement les captures de CRC, ni celles des insectes non-cibles. Nous avons donc sélectionné dix trous de 4 mm par côté afin de réduire le temps de confection des pièges.

La seconde expérience visait à sélectionner un attractif optimal pour maximiser la capture de CRC tout en minimisant celle des pollinisateurs et des ennemis naturels. Les résultats révèlent qu'un attractif est plus efficace que les autres à capturer les CRC: le 4OCT313. L'attractif 4OCT313 attire considérablement plus de CRC et d'abeilles que les autres attractifs. Le type de piège utilisé lors de cette deuxième expérience possédait vingt trous de 6 mm de diamètre ce qui explique pourquoi un nombre élevé d'abeilles fut capturé durant cette expérience. Le piège optimal contre la CRC est donc le piège avec dix trous de 4 mm de diamètre par côté combiné avec le 4OCT313. Ce piège possède un pouvoir attractif maximal tout en limitant les captures d'insectes non-cibles.

Le chapitre trois consiste à évaluer le piégeage massif de la CRC en situation réelle de champs, en utilisant le piège optimisé. Les résultats démontrent que la technique de piégeage massif n'est pas suffisamment efficace pour contrôler les populations de CRC en conditions réelles de champ dans les parcelles de cucurbitacées au cours de la saison de croissance. L'hypothèse 3 stipulant que la technique de piégeage de masse réduirait et maintiendrait les populations de CRC sous le seuil économique des dommages (1 individu par plant) n'est donc pas validée. Cette hypothèse était basée sur les résultats de Piñero & Lee (2016) où leurs essais étaient parvenus à réduire et maintenir les nombres de CRC sur les

plants sous le seuil économique des dommages. Trois types de résultats sont observés parmi les six répliques d'année-site : 1) une réduction significative du nombre de CRC par plant dans la zone avec pièges, le résultat espéré de la technique de piégeage massif, 2) aucune différence entre les zones avec pièges et sans pièges, et 3) une augmentation significative du nombre moyen de CRC par plant dans les zones avec pièges (**voir tableau 4.1**).

Plusieurs facteurs biotiques et abiotiques pourraient avoir contribué à ces résultats divergents. On constate que les répliques où le piégeage massif a été efficace, soit St-Bruno-de-Montarville 2021 et Farnham 2020, n'ont pas de facteurs en commun (**voir tableau 4.1**). Cela signifie qu'il existe probablement plusieurs facteurs différents ayant contribué au résultat positif de la méthode dans chacune des parcelles/années. Nous pouvons formuler certaines hypothèses. D'abord, à Saint-Bruno-de-Montarville en 2021, les sols lourds des parcelles se sont beaucoup asséchés dû aux conditions météorologiques de cette saison et à l'absence d'irrigation régulière. Cette sécheresse a causé la mort de nombreux plants dans les parcelles ce qui a réduit le nombre d'hôtes disponibles pour les CRCs. Ceci a peut-être incité les CRCs à aller dans les pièges car elles avaient un nombre limité d'hôtes. De plus, les chrysomèles de la sous-tribu *Diabroticina* telle que la CRC préfèrent les sols humides pour la ponte car les conditions sèches réduisent la production et la survie des œufs (Chalfant et Mitchell, 1967; Dominique *et al.*, 1983; Krysan, 1986). Bien que les captures étaient basses en comparaison à l'année précédente au même site, celles-ci étaient possiblement suffisantes pour réduire le nombre de CRCs par plant du côté protégé. Ce serait donc la sécheresse du sol qui aurait contribué au succès de la méthode de piégeage pour ce réplique.

Tableau 4.1 Facteurs expliquant les différentes réponses des six répliquas d'année-site.

Site	Année	Réponse	Espèces et variétés de cucurbitacées	Paysages avoisinants	Captures de CRC (Nbr de CRC capturés)	Seuil dépassé avant 5F	Aridité	Paillis de plastique
St-Bruno-de-Montarville	2020	∅	Blue Hubbard (<i>C. maxima</i>)	Paysage agricole	Élevée (4589)	Oui	Normale	Non
St-Bruno-de-Montarville	2021	+	Blue Hubbard (<i>C. maxima</i>)	Paysage agricole	Basse (211)	Oui	Élevée	Oui
St-Nazaire	2020	-	Deux parcelles avec un mélange de variétés de <i>C. moschata</i> et <i>C. pepo</i> , une parcelle de melons d'eau (<i>C. lanatus</i>)	Paysage agricole	Élevée (2098)	Oui	Normale	Non
St-Nazaire	2021	∅	Une parcelle avec un mélange de variétés <i>C. moschata</i> et <i>C. pepo</i> , une parcelle de zuchinnis (<i>C. pepo</i>), une parcelle de concombres (<i>C. sativus</i>)	Paysage agricole	Basse (276)	Non	Élevée	Non
Farnham	2020	+	Courges butternut (<i>C. moschata</i>) mélangées avec des variétés de <i>C. pepo</i>	Paysage forestier	Élevée (1213)	Non	Normale	Non
Farnham	2021	∅	Courges butternut (<i>C. moschata</i>) mélangées avec des variétés de <i>C. pepo</i>	Paysage agricole	Basse (502)	Non	Élevée	Non

Farnham 2020 était le seul réplica où les parcelles étaient entourées de forêt. Cet emplacement aidait notamment à réduire le vent. Les écomones volatiles synthétisées émises par les attractifs étaient possiblement moins diffusées que dans les autres réplicas année-site, ce qui a résulté en un panache olfactif plus concentré. Les CRC avaient donc moins de difficultés à suivre les panaches olfactifs émis par les pièges (Aartsma *et al.*, 2017; Bau et Cardé, 2015).

Deux des trois réplicas où aucune différence n'a été observée partageaient plusieurs caractéristiques (voir **tableau 4.1**). D'abord, St-Nazaire 2021 et Farnham 2021 avaient eu peu de captures de CRCs et le seuil des dommages d'une CRC par plant n'avait pas été dépassé avant le stade 5F. Les pièges ont donc capturé moins de CRCs car il y avait moins de CRCs dans les parcelles. De plus, toutes les parcelles étaient plantées d'un mélange de courges, de concombres ou de zucchini et n'étaient pas entourées de forêts. Le vent a possiblement diffusé les écomones synthétiques des pièges, les CRCs n'ont donc pas toujours réussi à trouver les pièges et sont restées sur les plants. Certaines variétés de cucurbitacées plantées étaient attirantes pour les CRCs, dont les concombres, les zucchini et les courges d'été ce qui peut expliquer la préférence des plants au lieu des pièges (voir **figure 4.1**; (Boucher, 2007). Cette préférence pour les plants indique que les pièges ne sont pas suffisamment optimisés pour attirer efficacement les CRCs.

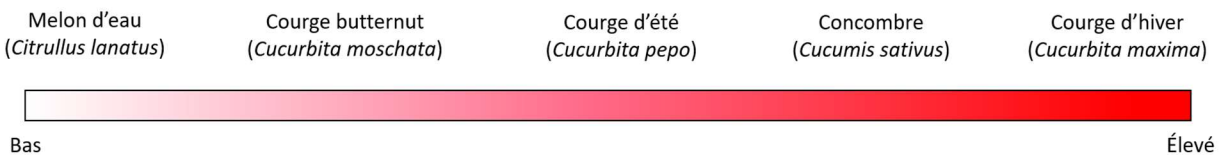


Figure 4.1 Ordre de préférence alimentaire des CRC des cucurbitacées plantées dans les parcelles selon Boucher 2007.

En outre, St-Bruno-de-Montarville 2020 avait d'autres facteurs pouvant expliquer l'absence de réponse. Les captures étaient élevées et le seuil était aussi dépassé avant le stade 5F. Les pièges n'ont

probablement pas eu d'effet significatif sur les populations de CRCs dans les parcelles car la direction et la force du vent étaient particulières à chaque site et donc leur effet sur la diffusion écomonale pouvait être variable. De plus, les parcelles étaient plantées de courge Blue Hubbard, une variété de courge préférée par la CRC (Couture, 2017). L'humidité du sol était normale, les populations de CRCs pouvant donc proliférer grâce aux conditions favorables du sol.

Finalement, on constate que le réplica année-site où il y avait une augmentation significative des CRCs du côté protégé des parcelles avait aussi une capture élevée de CRCs durant la saison de croissance et le seuil était dépassé avant le stade 5F (voir **tableau 4.1**). Or, il est difficile de confirmer avec certitude quels facteurs pouvaient avoir contribué au succès de la méthode de piégeage dans ces réplicas.

L'expérience devrait être répétée avec plus de parcelles par site et de réplicas année-site. De plus, des combinaisons de variétés similaires de cucurbitacées devraient être utilisées dans toutes les réplicas, ce qui n'avait pas été possible dans nos essais. La forme des pièges devrait aussi être modifiée afin de mieux contrôler le panache olfactif des molécules volatiles diffusées par le vent. Faire ces ajustements aiderait à mieux comprendre les facteurs qui influencent la méthode de piégeage.

Bien que la technique de piégeage massif n'ait pas été pleinement efficace pour le contrôle de la CRC dans notre étude, elle possède possiblement un certain potentiel. Les réplicas de St-Bruno-de-Montarville en 2021 et de Farnham en 2020 ont vu une réduction et un maintien des populations de CRCs sous le seuil économique des dommages. La technique doit être réévaluée avec idéalement un nombre de réplicas plus important. De plus, les pièges devraient pouvoir capturer les CRCs dès le printemps. Des essais de captures printanières (avril à juin) ont été effectués à St-Nazaire-d'Acton en 2020 et à St-Bruno-de-Montarville en 2021. Lors de ces essais, aucune CRC n'avait été capturée à St-Bruno-de-Montarville et 129 CRC avaient été capturées à St-Nazaire-d'Acton au cours des trois premières semaines de juin, correspondant à 6% des captures de la saison de croissance. Ces captures

étaient peu élevées considérant que les CRCs émergentes du printemps forment le premier des deux pics de population observés chez les CRCs au Québec (Couture, 2017). Une capture hâtive est primordiale car c'est au printemps que les plants sont infectés par le flétrissement bactérien transmis par les CRCs et sont les plus vulnérables à cette maladie (Richard et Boivin, 1994). L'utilisation de la vittatalactone, la phéromone d'agrégation utilisée par les CRCs au printemps lorsque celles-ci trouvent des cucurbitacées, serait une voie intéressante pour le contrôle des CRCs au printemps (Morris *et al.*, 2005; Smyth et Hoffmann, 2003; Weber, 2018). La synthèse de la vittatalactone pour l'usage en piégeage est en cours (Weber *et al.*, 2023). Une version synthétisée de cette phéromone pourrait être utilisée comme remplacement au 4OCT313 au printemps lors des premières invasions de CRCs dans les champs afin d'améliorer la méthode de piégeage massif (Weber, 2018). La vittatalactone sert de premier signal d'attraction pour les CRC avant le début de la saison de croissance des cucurbitacées vu qu'il n'y a pas encore de fleurs émettant des écomones (Morris *et al.*, 2005; Smyth et Hoffmann, 2003). Utiliser la vittatalactone pourrait être pertinent pour la capture de CRC dès leur arrivée dans les parcelles de cucurbitacées. Des études approfondies sur cette avenue potentielle sont nécessaires car les méthodes de contrôle de la CRC existantes posent de sérieux risques environnementaux ou sont inefficaces (Cavanagh *et al.*, 2009; Couture, 2020; Lechenet *et al.*, 2017). Par exemple, l'imidaclopride, le clothianidine et le thiamethoxam, trois néonicotinoïdes utilisés au Canada pour contrôler la CRC, ont des effets toxiques sur d'importants pollinisateurs de la courge telle que l'abeille de la courge, *E. pruinosa*, une espèce spécialiste des cucurbitacées (ARLA, 2014; Willis Chan *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020; Willis Chan et Raine, 2021). Les néonicotinoïdes ont aussi des effets neurotoxiques sur les oiseaux et les mammifères, incluant les humains (Addy-Orduna *et al.*, 2019; Costas-Ferreira et Faro, 2021; Li *et al.*, 2020). Additionnellement, les consommateurs conscients aux effets des pesticides sur leur santé et sur l'environnement choisissent davantage de produits biologiques et/ou veulent encourager la réduction de pesticides en agriculture conventionnelle (Peng, 2019; Reganold et Wachter, 2016;

Lévesque *et al.*, 2021; Loftsgard, 2019; Loftsgard, 2020)). Des méthodes de lutte alternatives contre la CRC sont donc requises pour offrir des options favorables aux producteurs, aux consommateurs et à l'environnement. Finalement, il est primordial de continuer la recherche sur des stratégies de contrôles novatrices en culture biologique, telle que les cultures-pièges (courge Blue Hubbard) et les plantes compagnes (capucines), l'usage d'agents de lutte biologique comme la mouche tachinaire *C. cetosa* et la guêpe parasitoïde *C. diabroticae*, et l'usage de la vittatalactone comme attractif pour piéger les CRCs (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2022; Haber *et al.*, 2021; Weber *et al.*, 2023).

Enfin, la méthode de piégeage massif pourrait aussi être une voie intéressante pour le contrôle d'autres espèces, notamment la chrysomèle des racines du maïs de l'Ouest, *D. virgifera virgifera*. Cette espèce est l'un des plus importants ravageurs du maïs (*Zea mays* L.), pouvant coûter aux producteurs de maïs plus d'un milliard de dollars chaque année en Amérique du Nord et en Europe (Gray *et al.*, 2009; Tabashnik, 2016). Une importante quantité de CRW a été capturée au cours de nos expériences. En effet, les pièges pouvaient capturer des centaines d'individus en une semaine. Par exemple, un total 15 176 et 6 413 CRW ont été capturées par nos pièges au cours de la saison de croissance à St-Nazaire-d'Acton en 2020 et 2021 respectivement. La méthode pourrait donc servir au contrôle de plus d'une espèce problématique.

ANNEXE 1

Article publié dans le journal de la Terre de Chez Nous (2021) :

<https://www.laterre.ca/actualites/cultures-maraicheres-la-chrysomele-rayee-dans-la-mire-des-chercheurs/>

Article publié dans le magazine Les Débrouillards (2022) :

<https://www.lesdebrouillards.com/magazine/les-debrouillards-juillet-aout-2022-des-nouvelles-du-futur/>

Capsule vidéo en collaboration avec le Laboratoire d’Agriculture Urbaine (2021) :

<https://www.youtube.com/watch?v=UUDlzVCu8og&t=43s>

Présentation aux vendredis Horticoles de la Montérégie (2021) :

<https://www.youtube.com/watch?v=osC8FQlghEU&t=2450s>

RÉFÉRENCES

- Aartsma, Y., Bianchi, F. J. J. A., Van Der Werf, W., Poelman, E. H. et Dicke, M. (2017). Herbivore-induced plant volatiles and tritrophic interactions across spatial scales. *New phytologist*, 216(4), 1054-1063. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.14475>
- Addy-Orduna, L. M., Brodeur, J. C. et Mateo, R. (2019). Oral acute toxicity of imidacloprid, thiamethoxam and clothianidin in eared doves: A contribution for the risk assessment of neonicotinoids in birds. *Science of The Total Environment*, 650, 1216-1223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.112>
- Adler, L., et Hazzard, R. (2009). Comparison of perimeter trap crop varieties: effects on herbivory, pollination, and yield in butternut squash. *Environmental Entomology*, 38(1), 207-215. <https://doi.org/10.1603/022.038.0126>
- Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2019). *Décision de réévaluation RVD2019-04, Thiaméthoxame et préparations commerciales connexes : réévaluation axée sur les insectes pollinisateurs*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/secure-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/decisions-mises-jour/decision-reevaluation/2019/thiamethoxame.html44>
- Agence de Réglementation de la Lutte Antiparasitaire. (2014). *Note de réévaluation REV2014-06, Examens spéciaux : Risques environnementaux potentiels pour Peponapis pruinosa découlant de l'exposition à de la clothianidine, à de l'imidaclopride et à du thiaméthoxame utilisés sur des cucurbitacées*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/secure-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/decisions-mises-jour/note-reevaluation/2014/peponapis-pruinosa-decoulant-exposition-clothianidine-imidaclopride-rev2014-06.html>
- Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (2018). *Projet de décision de réévaluation RVD2018-12, Imidaclopride et préparations commerciales connexes : réévaluation axée sur les insectes pollinisateurs*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/secure-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/decisions-mises-jour/decision-reevaluation/2019/thiamethoxame.html>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2022). *Lutter contre la chrysomèle rayée du concombre et la chrysomèle maculée du concombre*. Gouvernement du Canada. <https://agriculture.canada.ca/fr/nouvelles-dagriculture-agroalimentaire-canada/realisations-scientifiques-agriculture/lutter-contre-chrysomele-rayee-du-concombre-chrysomele-maculee-du-concombre>
- Alyokhin, A., Baker, M., Mota-Sanchez, D., Dively, G., et Grafius, E. (2008). Colorado potato beetle resistance to insecticides. *American Journal of Potato Research*, 85(6), 395-413. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9052-0>

- Andersen, J. F., et Metcalf, R. L. (1986). Identification of a volatile attractant for *Diabrotica* and *Acalymma* spp. from blossoms of *Cucurbita maxima* (Duchesne). *Journal of chemical ecology*, 12(3), 687-699. <https://doi.org/10.1007/bf01012102>
- Andrews, E. S., Theis, N., et Adler, L. S. (2007). Pollinator and Herbivore Attraction to Cucurbita Floral Volatiles. *Journal of chemical ecology*, 33(9), 1682-1691. <https://doi.org/10.1007/s10886-007-9337-7>
- Atreya, K., Sitaula, B. K., Johnsen, F. H., et Bajracharya, R. M. (2011). Continuing Issues in the Limitations of Pesticide Use in Developing Countries. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 24(1), 49-62. <https://doi.org/10.1007/s10806-010-9243-9>
- Bau, J. et Cardé, R. T. (2015). Modeling Optimal Strategies for Finding a Resource-Linked, Windborne Odor Plume: Theories, Robotics, and Biomimetic Lessons from Flying Insects. *Integrative and Comparative Biology*, 55(3), 461-477. <https://doi.org/10.1093/icb/icv036>
- Boisclair, J., et Estevez, B. (2006). Lutter contre les insectes nuisibles en agriculture biologique : intervenir en harmonie face à la complexité. *Phytoprotection*, 87(2), 83-90. <https://doi.org/10.7202/013977ar>
- Bomfim, I., Freitas, B., Aragão, F., et Walters, A. (2016). Pollination in Cucurbit crops. *Handbook of Cucurbits: Growth, Cultural Practices, and Physiology* (1^{ère} ed. p. 181-200). CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/b19233-16>
- Boucher, T. J. (2007). *Striped Cucumber Beetles Fact Sheet*. <http://ipm.uconn.edu/documents/raw2/Striped%20Cucumber%20Beetles/Striped%20Cucumber%20Beetles%20.php?aid=75>
- Boucher, T. J., & Durgy, R. (2004). Demonstrating a perimeter trap crop approach to pest management on summer squash in New England. *Journal of Extension*, 42, 1-8. <https://archives.joe.org/joe/2004october/rb2.php>
- Brandt, K. (2012). *Organic options for striped cucumber beetle management in cucumbers*. [Mémoire de maîtrise, Grand Valley State University]. Scholarworks@gvsu. <https://scholarworks.gvsu.edu/theses/29/?utm>
- Brzozowski, L., Leckie, B. M., Gardner, J., Hoffmann, M. P. et Mazourek, M. (2016). *Curcubita pepo* subspecies delineates striped cucumber beetle (*Acalymma vittatum*) preference. *Horticulture Research*, 3(1), 16028. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.28>
- Capinera, J. (2020). Order Coleoptera – Beetles, White Grubs, and Wireworms. *Handbook of vegetable pests* (2^e éd., p. 63-204). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814488-6.00005-4>
- Cavanagh, A., Hazzard, R., Adler, L. et Boucher, J. (2009). Using trap crops for control of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae) reduces insecticide use in butternut squash. *Journal of Economic Entomology*, 102(3), 1101-1107. <https://doi.org/10.1603/029.102.0331>

- Cha, D.H., Gill, M.A., Epsky, N.D., Werle, C.T., Adamczyk, J.J. Jr. et Landolt, P.J. (2015). From a non-target to a target: Identification of a fermentation volatile blend attractive to *Zaprionus indianus*. *Journal of Applied Entomology*, 139(1-2), 114–122. <https://doi.org/10.1111/jen.12164>
- Chalfant, R. B. et Mitchell, E. R. (1967). Some Effects of Food and Substrate on Oviposition of the Spotted Cucumber Beetle1. *Journal of Economic Entomology*, 60(4), 1010-1012. <https://doi.org/10.1093/jee/60.4.1010>
- Chittenden, F. H. (1923). *The striped cucumber beetle and how to control it*. [Bulletin d'information]. Département de l'Agriculture des États-Unis. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc6470/>
- Clark, T. L., Meinke, L. J., et Foster, J. E. (2001). Molecular phylogeny of *Diabrotica* beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) inferred from analysis of combined mitochondrial and nuclear DNA sequences. *Insect Molecular Biology*, 10(4), 303-314. <https://doi.org/10.1046/j.0962-1075.2001.00269.x>
- Coco, A. M., Lewis, M. T., Fleischer, S. J., et Tooker, J. F. (2020). Parasitoids, Nematodes, and Protists in Populations of Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Entomology*, 49(6), 1316-1326. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaa116>
- Costas-Ferreira, C. et Faro, L. R. F. (2021). Neurotoxic Effects of Neonicotinoids on Mammals: What Is There beyond the Activation of Nicotinic Acetylcholine Receptors?—A Systematic Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8413. <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/16/8413>
- Couture, I. (2017). *Fiche technique de la chrysome rayée du concombre*. IRIS phytoprotection. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Insecte?imageId=4237#:~:text=Pupe%20%3A%204%2C0%20%C3%A0%206,pattes%20sont%20jaunes%20et%20noires>
- Couture, I. (2020). *Principaux insecticides et fongicides homologués pour les cucurbitacées en 2020* Agriréseau (vol. 1) [Bulletin d'information]. Agriréseau. https://www.agrireseau.net/rap/documents/105554/cucurbitacees-bulletin-d_information-no-1-principaux-insecticides-et-fongicides-homologues-pour-les-cucurbitacees-en-2021
- De Clercq, P., Mason, P. G., et Babendreier, D. (2011). Benefits and risks of exotic biological control agents. *BioControl*, 56(4), 681-698. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9372-8>
- Delaplane, K., et Mayer, D. F. (2000). Bee pollination. *Crop Pollination by Bees* (1^{ère} éd., p. 8-17). Cabi publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851994482.0008>
- Dent, D., et Binks, R. H. (2020). *Insect pest management* (2^e éd.). Cabi publishing. <https://www.embrapa.br/documents/1344498/2767889/insect-pest-management.pdf/314d8a03-c54e-4e90-a320-37ca1ad77aeb>
- Dicke, M., et Takken, W. (2006). Chemical ecology: a multidisciplinary approach. *Chemical ecology: from gene to ecosystem* (1^{ère} éd., p. 1-8). Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/9781402047831>

- Dobson, H.E.M. et Bernays, E. (1994). *Insect-Plant Interactions: Floral volatiles in insect biology* (1 éd., vol. 5). Bernays, E.A. <https://doi.org/10.1201/9780203711651>
- Dominique, C. R., Yule, W. N. et Martel, P. (1983). Influence of soil type, soil moisture, and soil surface conditions on oviposition preference of the northern corn rootworm, *Diabrotica longicornis* (Coleoptera: Chrysomelidae). *The Canadian Entomologist*, 115(8), 1043-1046. <https://doi.org/10.4039/Ent1151043-8>
- Duval, J. (2013). *Stratégies gagnantes dans la lutte contre certains insectes ravageurs des cultures maraîchères biologiques* [Présentation]. Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité. https://cetab.bio/system/files/publications/strategies_gagnantes_phytoprotection_-_j_duval_-_8_fevrier_2013.pdf
- Eaton, A. (2016). *Striped Cucumber Beetle Pest Fact Sheet 20* [Fiche]. University of New Hampshire. https://extension.unh.edu/sites/default/files/migrated_unmanaged_files/Resource000554_Rep576.pdf
- Eilenberg, J., Hajek, A., et Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387-400. <https://doi.org/10.1023/A:1014193329979>
- Ellers-Kirk, C., et Fleischer, S. J. (2006). Development and Life Table of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae), a Vector of *Erwinia tracheiphila* in Cucurbits. *Environmental Entomology*, 35(4), 875-880. <https://doi.org/10.1603/0046-225x-35.4.875>
- Ellers-Kirk, C. D., Fleischer, S. J., Snyder, R. H., & Lynch, J. P. (2000). Potential of Entomopathogenic Nematodes for Biological Control of *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae) in Cucumbers Grown in Conventional and Organic Soil Management Systems. *Journal of Economic Entomology*, 93(3), 605-612. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-93.3.605>
- Evans, B. et Renkema, J. (2018). Striped Cucumber Beetle *Acalymma vittatum* F. (Insecta: Coleoptera: Chrysomelidae). *EDIS*, EENY-707. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/IN1215>
- Fitts, J. B. M. (2000). *Fiche technique de la citrouille et de la courge*. [Fiche technique]. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-032.htm#climatic>.
- Fleischer, S. J., de Mackiewicz, D., Gildow, F. E., et Lukezic, F. L. (1999). Serological Estimates of the Seasonal Dynamics of *Erwinia tracheiphila* in *Acalymma vittata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Entomology*, 28(3), 470-476. <https://doi.org/10.1093/ee/28.3.470>
- Flint, M. L., et Van den Bosch, R. (2012). *Introduction to integrated pest management*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9212-9>
- Gardner, J., Hoffmann, M. P. et Mazourek, M. (2015). Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) Aggregation in Response to Cultivar and Flowering. *Environmental Entomology*, 44(2), 309-316. <https://doi.org/10.1093/ee/nvu061>

- Gassmann, A. J., Petzold-Maxwell, J. L., Keweshan, R. S., et Dunbar, M. W. (2011). Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm. *PLoS one*, 6(7).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022629>
- Gould, G.E (1942). *The Biology and Control of the Striped Cucumber Beetle*. [Dissertation, Purdue University]. Proquest.
<https://www.proquest.com/openview/fc0e333718a9e27578674f4ddb56d51c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Gray, M. E., Ratcliffe, S. T., et Rice, M. E. (2008). The IPM paradigm: concepts, strategies and tactics. *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626463.002>
- Gray, M. E., Sappington, T. W., Miller, N. J., Moeser, J. et Bohn, M. O. (2009). Adaptation and invasiveness of western corn rootworm: intensifying research on a worsening pest. *Annual review of entomology*, 54, 303-321. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.54.110807.090434>
- Gross, J. (2017). Fly from spotted cucumber beetle - *Celatoria diabroticae* [Photographie]. Bugguide.
<https://bugguide.net/node/view/1407823>
- Haber, A. I., Wallingford, A. K., Grettenberger, I. M., Ramirez Bonilla, J. P., Vinchesi-Vahl, A. C. et Weber, D. C. (2021). Striped cucumber Beetle and Western Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 12(1).
<https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa026>
- Hajek, A. E. (2004). *Natural enemies: An Introduction to Biological Control* (1^{ère} éd., p. 66-80). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811838>
- Hill, S. B. (1989). Cultural methods of pest, primarily insect, control. *Ecological Agriculture Projects*.
<https://eap.mcgill.ca/publications/eap58.htm>
- Hinds, J., et Hooks, C. R. R. (2013). Population dynamics of arthropods in a sunn-hemp zucchini interplanting system. *Crop Protection*, 53, 6-12. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.003>
- Hodek, I., et Honêk, A. (2013). Effectiveness and Utilization. *Ecology of coccinellidae* (1^{ère} éd., p. 351-389). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1349-8>
- Ingwell, L. L., et Kaplan, I. (2019). Insect Exclusion Screens Reduce Cucumber Beetle Infestations in High Tunnels, Increasing Cucurbit Yield. *Journal of Economic Entomology*, 112(4), 1765-1773.
<https://doi.org/10.1093/jee/toz060>
- Ingwell, L. L., Thompson, S. L., Kaplan, I., & Foster, R. E. (2017). High tunnels: protection for rather than from insect pests? *Pest management science*, 73(12), 2439-2446.
<https://doi.org/10.1002/ps.4634>
- IIRIS phytoprotection (2020). *Chrysomèle rayée du concombre*. [Base de données].
<https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Insecte?imageId=4237>

- Isley, D. (1927). *The striped cucumber beetle*. [Bulletin d'information]. Arkansas Agricultural Experiment Station Bulletin (S37.E2, No.216). University of Arkansas Libraries, Fayetteville, Arkansas.
<https://digitalcollections.uark.edu/digital/collection/ArkBulletins/id/277/rec/1>
- Jackson, D. M., Sorensen, K., Sorenson, C. et Story, R. (2005). Monitoring cucumber beetles in sweetpotato and cucurbits with kairomone-baited traps. *Journal of Economic Entomology*, 98(1), 159-170. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-98.1.159>
- Kahl, H. (2018). Pupa of tachinid fly (*Celatoria setosa*). [Photographie].
- Keable, S. (2018, Octobre 23). *Les cucurbitacées... une culture de circonstance pour la saison*. [Bulletin d'actualité]. *BioClips Actualité Bioalimentaire*.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2018/Volume_26_no_29.pdf
- Kenis, M., Hurley, B., Colombari, F., Lawson, S., Sun, J., Wilcken, C., Weeks, R., et Sathyapala, S. (2019). *Guide to the classical biological control of insect pests in planted and natural forests*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
<https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA3677EN>
- Klass, C. (2009). Striped cucumber beetle. [Fiche]. Cornell University.
<https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/81c58e9a-a5b6-4857-915d-b4cec37adc51/content>
- Kirby, D. (2016). *Striped Cucumber beetle*. University of Maine.
<https://extension.umaine.edu/ipm/ipddl/publications/5038e/>
- Kogan, M. (1998). Integrated Pest Management: Historical Perspectives and Contemporary Developments. *Annual review of entomology*, 43(1), 243-270.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.243>
- Krysan, J. L. (1986). Rearing and Handling of *Diabrotica virgifera* and *Diabrotica undecimpunctata howardi*. *Methods for the study of pest Diabrotica* (1^{ère} ed., p. 25-47). Springer New York.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4868-2>
- Latin, R., et Reed, G. (1985). Effect of root feeding by striped cucumber beetle larvae on the incidence and severity of fusarium wilt of muskmelon. *Phytopathology*, 75(2), 209-211.
<https://doi.org/10.1094/phyto-75-209>
- Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., et Munier-Jolain, N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, 3(3).
<https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>
- Legault, G. (2007). *Effect of kaolin on the striped cucumber beetle (*Acalymma vittatum*) and cucumber growth and development*. [Mémoire de maîtrise, Université McGill]. eScholarships@McGill.
<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/kh04ds42h>
- Le réseau d'avertissement Phytosanitaire (2021). *Chrysomèle rayée du concombre*. [Fiche technique].
https://www.agrireseau.net/documents/Document_97620.pdf

- Lévesque, A., Kermagoret, C., Poder, T. G., L'Ecuyer-Sauvageau, C., He, J., Sauvé, S. et Dupras, J. (2021, 2021/06/01/). Financing on-farm ecosystem services in southern Quebec, Canada: A public call for pesticides reduction. *Ecological Economics*, 184, 106997. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106997>
- Lewis, P.A., Lampman, R.L. et Metcalf, R.L. (1990). Kairomonal attractants for *Acalymma vittatum* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Entomology*, 19(1), 8–14. <https://doi.org/10.1093/ee/19.1.8>
- Li, Y., Miao, R. et Khanna, M. (2020). Neonicotinoids and decline in bird biodiversity in the United States. *Nature Sustainability*, 3(12), 1027-1035. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0582-x>
- Light, D. M., Knight, A. L., Henrick, C. A., Rajapaska, D., Lingren, B., Dickens, J. C., et Roitman, J. (2001). A pear-derived kairomone with pheromonal potency that attracts male and female codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Naturwissenschaften*, 88(8), 333-338. <https://doi.org/10.1007/s001140100243>
- Loftsgard, T. (2019). *The World of Organic Agriculture, Statistics and Emerging Trends 2019 : North America - Canada*. [Rapport annuel]. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and IFOAM – Organics International. <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2019.html>
- Loftsgard, T. (2020). *The World of Organic Agriculture, Statistics and Emerging Trends 2019 : North America - Canada*. [Rapport annuel]. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and IFOAM – Organics International. <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2020.html>
- Loreto, F., Dicke, M., Schnitzler, J.-P., et Turlings, T. C. J. (2014). Plant volatiles and the environment. *Plant, Cell & Environment*, 37(8), 1905-1908. <https://doi.org/10.1111/pce.12369>
- Martel, J., Alford, A., et Dickens, J. (2005). Synthetic host volatiles increase efficacy of trap cropping for management of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say). *Agricultural and Forest Entomology*, 7(1), 79-86. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2005.00248.x>
- McGregor, S. E. (1976). *Insect pollination of cultivated crop plants*. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture. <https://www.echocommunity.org/resources/f2b56497-4dcf-4018-9a13-e7439231416f>
- Metcalf, R. L., Lampman, R. L. et Deem-Dickson, L. (1995). Indole as an olfactory synergist for volatile kairomones for diabroticite beetles. *Journal of chemical ecology*, 21(8), 1149-1162. <https://doi.org/10.1007/BF02228317>
- Metcalf, R. L., et Metcalf, E. R. (1992). *Plant kairomones in insect ecology and control*. Chapman and Hall Ltd. <https://link.springer.com/book/9780412019913>
- Metcalf, R. L., Metcalf, R. A., et Rhodes, A. M. (1980). Cucurbitacins as kairomones for diabroticite beetles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 77(7), 3769-3772. <https://doi.org/10.1073/pnas.77.7.3769>
- Milosavljević, I., Hoddle, C.D., Mafra-Neto, A., Gómez-Marco, F. et Hoddle, M.S. (2020) Effects of Food Bait and Trap Type on Captures of *Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera: Curculionidae) and

- Trap Bycatch in Southern California. *Journal of Economic Entomology*, 113(5), 2407–2417. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa175>
- Ministère de l'Environnement de la Faune et des Parcs. (2021). *Faits saillants, Juin 2021: une chaleur record dans plusieurs localités du sud du Québec*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2021/juin.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2018). *À propos des pesticides*. Gouvernement du Québec. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/pesticides/apropos.htm>
- Morris, B. D., Smyth, R. R., Foster, S. P., Hoffmann, M. P., Roelofs, W. L., Franke, S., et Francke, W. (2005). Vittatalactone, a β -Lactone from the Striped Cucumber Beetle, *Acalymma vittatum*. *Journal of Natural Products*, 68(1), 26-30. <https://doi.org/10.1021/np049751v.s001>
- Nie, R., Andújar, C., Gómez-Rodríguez, C., Bai, M., Xue, H. J., Tang, M., et Vogler, A. P. (2020). The phylogeny of leaf beetles (Chrysomelidae) inferred from mitochondrial genomes. *Systematic Entomology*, 45(1), 188-204. <https://doi.org/10.1111/syen.12387>
- Nordlund, D. A., et Lewis, W. J. (1976). Terminology of chemical releasing stimuli in intraspecific and interspecific interactions. *Journal of Chemical Ecology*, 2(2), 211–220. <https://doi.org/10.1007/bf00987744>
- Nunes, C. E. P., Peñaflor, M. F. G. V., Bento, J. M. S., Salvador, M. J., et Sazima, M. (2016). The dilemma of being a fragrant flower: the major floral volatile attracts pollinators and florivores in the euglossine-pollinated orchid *Dichaea pendula*. *Oecologia*, 182(4), 933-946. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3703-5>
- Oxford Reference. (2023). Chemical control. Dans *Oxford reference*. Récupéré le 30 août 2023 <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095605302>
- Patterson, A. D., Gonzalez, F. J., et Idle, J. R. (2010). Xenobiotic metabolism: a view through the metabolometer. *Chemical research in toxicology*, 23(5), 851-860. <https://doi.org/10.1021/tx100020p>
- Peng, M. (2019). The Growing Market of Organic Foods: Impact on the US and Global Economy. Dans D. Biswas et S. A. Micallef (dir.), *Safety and Practice for Organic Food* (p. 3-22). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812060-6.00001-5>
- Pessarakli, M. (2016). *Handbook of Cucurbits: growth, cultural practices, and physiology*. CRC Press.
- Piñero, J., (2018). A Comparative Assessment of the Response of Two Species of Cucumber Beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) to Visual and Olfactory Cues and Prospects for Mass Trapping. *Journal of Economic Entomology*, 111(3), 1439-1445. <https://doi.org/10.1093/jee/toy094>
- Piñero, J., et Lee, R. (2016). A novel mass trapping system to control cucumber beetles in cucurbit crops. *Integrated Pest Management University of Missouri*, Missouri Environment & Garden. 4-8. <https://ipm.missouri.edu/MEG/archive/2016/v22n6.pdf>

- Pitblado, R., et Lucy, R. (1994). Chrysomèles du concombre. *Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada* (1^{ère} éd., p. 148-149). Société d'entomologie du Canada.
<https://phytopath.ca/publications/maladies-et-ravageurs-des-cultures-legumieres-au-canada/>
- Pitts, J., Mozūraitis, R., Gauvin-Bialecki, A., & Lempérière, G. (2014). The roles of kairomones, synomones and pheromones in the chemically-mediated behaviour of male mosquitoes. *Acta Tropica*, 132(supplement), S26-S34. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2013.09.005>
- Porcel, M., Cotes, B., & Campos, M. (2011). Biological and behavioral effects of kaolin particle film on larvae and adults of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Biological Control*, 59(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.07.011>
- Reganold, J. P. et Wachter, J. M. (2016, 2016/02/03). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2(2), 15221. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- Richard, C., & Boivin, G. (1994). Cucurbitacées. *Maladies et ravageurs des cultures légumières au Canada* (1^{ère} éd., p. 136-149). Société d'entomologie du Canada.
<https://phytopath.ca/publications/maladies-et-ravageurs-des-cultures-legumieres-au-canada/>
- Robert, C. A. M., Erb, M., Hibbard, B. E., Wade French, B., Zwahlen, C., et Turlings, T. C. J. (2012). A specialist root herbivore reduces plant resistance and uses an induced plant volatile to aggregate in a density-dependent manner. *Functional Ecology*, 26(6), 1429-1440.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02030.x>
- Rojas, E. S., Batzer, J. C., Beattie, G. A., Fleischer, S. J., Shapiro, L. R., Williams, M. A., Bessin, R., Bruton, B. D., Boucher, T. J., Jesse, L. C. H. et Gleason, M. L. (2015). Bacterial Wilt of Cucurbits: Resurrecting a Classic Pathosystem. *Plant Disease*, 99(5), 564-574. <https://doi.org/10.1094/pdis-10-14-1068-fe>
- Rojas, E. S., Gleason, M. L., Batzer, J. C., et Duffy, M. (2011). Feasibility of Delaying Removal of Row Covers to Suppress Bacterial Wilt of Muskmelon (*Cucumis melo*). *Plant Disease*, 95(6), 729-734.
<https://doi.org/10.1094/pdis-11-10-0788>
- SAGe pesticides (2020). *Effets toxiques des matières actives*. [Base de données].
<https://www.sagepesticides.qc.ca>
- SAGe Pesticides (202). *Fiche matière active : Toxicologie de la matière active : pyréthrinés*. [Fiche].
<https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveID=166&searchText=pyr%C3%A9thrines&isProduct=False>
- SAGe Pesticides (2024). *Fiche produit commercial : Information sur le produit commercial : CLUTCH 50 WDG*. [Fiche].
<https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheProduit/DisplayProduit?ProduitCommercialId=1252&searchText=CLUTCH%2050%20WDG&isProduct=True>
- SAGe Pesticides (2024). *Fiche produit commercial : Information sur le produit commercial : MATADOR 120EC*. [Fiche].
<https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheProduit/DisplayProduit?ProduitCommercialId=149&searchText=MATADOR%20120EC&isProduct=True>

- Santé Canada (2020). *Sécurité des produits de consommation*. [Base de données]. Gouvernement du Canada. <https://pr-rp.hc-sc.gc.ca/lr-re/index-fra.php>
- Shapiro, L., De Moraes, C.M., Stephenson, A.G. et Mescher, M.C. (2012), Pathogen effects on vegetative and floral odours mediate vector attraction and host exposure in a complex pathosystem. *Ecology Letters*, 15(12): 1430-1438. <https://doi.org/10.1111/ele.12001>
- Shee, C. N. (2022). *Developing attractants and deterrents for a push-pull striped cucumber beetle management system* [Dissertation, Purdue University Graduate School]. Purdue University. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Developing_attractants_and_deterrents_for_a_push-pull_striped_cucumber_beetle_management_system/19876366
- Smyth, R. R., et Hoffmann, M. P. (2003). A male-produced aggregation pheromone facilitating *Acalymma vittatum* [F.](Coleoptera: Chrysomelidae) early-season host plant colonization. *Journal of insect behavior*, 16(3), 347-359. <https://doi.org/10.1023/A:1024824025210>
- Snyder, W.E. (2019). *Managing Cucumber Beetles in Organic Farming Systems*. eOrganic. <https://eorganic.org/node/5307>
- Souza, D., Vieira, B. C., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., Peterson, J. A., Kruger, G. R., et Meinke, L. J. (2019). Western corn rootworm pyrethroid resistance confirmed by aerial application simulations of commercial insecticides. *Scientific Reports*, 9(1), 6713. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43202-w>
- Sparks, M. E., Nelson, D. R., Haber, A. I., Weber, D. C., et Harrison, R. L. (2020). Transcriptome Sequencing of the Striped Cucumber Beetle, *Acalymma vittatum* (F.), Reveals Numerous Sex-Specific Transcripts and Xenobiotic Detoxification Genes. *BioTech*, 9(4), 21. <https://doi.org/10.3390/biotech9040021>
- Spears, L.R., Looney, C., Ikerd, H., Koch, J.B.; Griswold, T., Strange, J.P. et Ramirez, R.A. (2016). Pheromone Lure and Trap Color Affects Bycatch in Agricultural Landscapes of Utah. *Environmental Entomology*, 45(4), 1009–1016. <https://doi.org/10.1093/ee/nvw085>
- Staines, C. L., Ouml, I., et Smetana, A. (2011). Catalogue of Palaearctic Coleoptera, Volume 6. Chrysomeloidea. *Annals of the Entomological Society of America*, 104(3), 604. <https://doi.org/10.1603/008.104.0301>
- Statistique Canada (2019). *Tableau 32-10-0365-01, Superficie, production et valeur à la ferme des légumes*. [Base de données]. Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.25318/3210036501-fra>
- Szendrei, Z., et Rodriguez-Saona, C. (2010). A meta-analysis of insect pest behavioral manipulation with plant volatiles. *Entomologia experimentalis et applicata*, 134(3), 201-210. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2009.00954.x>
- Tabashnik, B. E. (2016). Tips for battling billion-dollar beetles. *Science*, 354(6312), 552-553. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aag101>

- Ternest, J. J., Ingwell, L. L., Foster, R. E., et Kaplan, I. (2020). Comparing Prophylactic Versus Threshold-Based Insecticide Programs for Striped Cucumber Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) Management in Watermelon. *Journal of Economic Entomology*, 113(2), 872-881. <https://doi.org/10.1093/jee/toz346>
- Theis, N., Barber, N. A., Gillespie, S. D., Hazzard, R. V., et Adler, L. S. (2014). Attracting mutualists and antagonists: plant trait variation explains the distribution of specialist floral herbivores and pollinators on crops and wild gourds. *American journal of botany*, 101(8), 1314-1322. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400171>
- Tinslay, J., Fournier, M., Couture, I., Lafontaine, P. J., Lefebvre, M. et Lucas, E. (2022). Optimization of a Mass Trapping Method against the Striped Cucumber Beetle *Acalymma vittatum* in Organic Cucurbit Fields. *Insects*, 13(5), 465. <https://doi.org/10.3390/insects13050465>
- Tóth, M., Csonka, É., Szarukán, I., Vörös, G., Furlan, L., Imrei, Z., et Vuts, J. (2006). The KLP+ (" hat") trap, a non-sticky, attractant baited trap of novel design for catching the western corn rootworm (*Diabrotica v. virgifera*) and cabbage flea beetles (*Phyllotreta* spp.)(Coleoptera: Chrysomelidae). *International Journal of Horticultural Science*, 12(1), 57-62. <https://doi.org/10.31421/IJHS/12/1/624>
- Vincent, C., Hallman, G., Panneton, B., et Fleurat-Lessard, F. (2003). Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual review of entomology*, 48(1), 261-281. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.091801.112639>
- Wang, Z., Zhao, Z., Cheng, X., Liu, S., Wei, Q., et Scott, I. M. (2016). Conifer flavonoid compounds inhibit detoxification enzymes and synergize insecticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 127, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.09.003>
- Weber, D. C. (2018). Field Attraction of Striped Cucumber Beetles to a Synthetic Vittatalactone Mixture. *Journal of Economic Entomology*, 111(6), 2988-2991. <https://doi.org/10.1093/jee/toy283>
- Weber, D. C., Khimian, A., Ramirez Bonilla, J. P., Grettenberger, I. M., Guzman, F. et Haber, A. I. (2023). Vittatalactone is the Male-Produced Aggregation Pheromone of the Western Striped Cucumber Beetle, *Acalymma trivittatum*. *Journal of chemical ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10886-023-01437-y>
- Willis Chan, D. S. et Raine, N. E. (2021). Hoary Squash Bees (*Eucera pruinosa*: Hymenoptera: Apidae) Provide Abundant and Reliable Pollination Services to Cucurbita Crops in Ontario (Canada). *Environmental Entomology*, 50(4), 968-981. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab045>
- Zhang, S.-Q., Che, L., Li, Y., Dan, L., Pang, H., Ślipiński, A., et Zhang, P. (2018). Evolutionary history of Coleoptera revealed by extensive sampling of genes and species. *Nature Communications*, 9(1), 205. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02644-4>
- Zhao, G.-P., Yang, F.-W., Li, J.-W., Xing, H.-Z., Ren, F.-Z., Pang, G.-F. et Li, Y.-X. (2020). Toxicities of Neonicotinoid-Containing Pesticide Mixtures on Nontarget Organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(10), 1884-1893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/etc.4842>

